

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie électrique

FABRICATION DE CELLULES SOLAIRES TRIPLE JONCTIONS À CONTACTS FACE ARRIÈRE

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie électrique

Xavier MACKRÉ-DELANNOY

Sherbrooke (Québec) Canada 17/01/2020

MEMBRES DU JURY

Vincent AIMEZ

Directeur

Maxime DARNON

Codirecteur

Abdelatif JAOUAD

Rapporteur

Serge ECOFFEY

Évaluateur

RÉSUMÉ

La génération d'électricité par effet **photovoltaïque** est un axe majeur dans le développement des énergies renouvelables. L'efficacité des cellules en Silicium (Si) ne progresse plus beaucoup. Pour atteindre de plus hautes efficacités, on peut utiliser des cellules multi-jonctions. Basées sur d'autres matériaux semiconducteurs, elles offrent des efficacités plus hautes. Ces cellules existent déjà, mais leur coût élevé les empêche de concurrencer la filière Si. L'approche utilisée est de concentrer la lumière solaire sur des cellules de faible surface grâce à des éléments optiques peu coûteux. Cette approche est appelée "Concentrated Photovoltaics" (**CPV**). Le prix des modules ainsi créés s'approche des modules Si. La fabrication de cellules plus faciles à assembler permettrait de faire encore baisser ces coûts pour concurrencer le Si.

Le travail décrit ici propose de renvoyer le contact émetteur de la cellule, traditionnellement en face avant, sur la face arrière afin de simplifier l'assemblage des modules voire d'en augmenter l'efficacité. Ce projet est développé sur des cellules solaires **triple jonction** (InGaP/(In)GaAs/Ge) qui sont les plus utilisées sur le marché. Au meilleur de nos connaissances, de telles cellules avec des **contacts en face arrière** n'ont jamais été reportées dans la littérature. Ces cellules seraient plus faciles à assembler en module et permettraient même un gain d'efficacité dans les modules de type "Dense Receiver Array" (**DRA**). Ce projet vise à atteindre une preuve de concept. Ces nouveaux contacts ouvriraient la voie à des améliorations futures de l'efficacité individuelle des cellules. On pourrait par exemple en multipliant les **vias** de faible dimension supprimer la métallisation avant et son ombrage.

Ce mémoire retrace le développement en salle blanche d'un procédé pour la **microfabrication** de telles cellules à contacts face arrière. Après avoir expliqué l'intérêt de cette approche et analysé la littérature pour identifier les obstacles technologiques, on analysera les solutions technologiques permettant de les surmonter. La méthodologie employée sera explicitée, puis le procédé de fabrication retenu sera présenté et justifié. Finalement, les résultats de la caractérisation électrique des cellules fabriquées seront présentés et analysés.

Mots clés : photovoltaïque, CPV, triple jonction, contacts face arrière, DRA, via, microfabrication

REMERCIEMENTS

Même si j'ai effectué moi-même la plupart des manipulations et travaux du projet, il n'aurait pu être mené à bien sans la contribution et le soutien de nombreuses personnes.

Je tiens d'abord à remercier mes directeurs et encadrants Maxime, Abdelatif, Maïté et Vincent qui ont rendu ce projet possible financièrement et matériellement. Le soutien, le suivi et l'encadrement qu'ils m'ont fourni m'ont aidé dans mes choix et mes baisses de motivation.

Pour leur soutien scientifique, émotionnel et amical je tiens à remercier tous les étudiants du groupe CPV avec lesquels j'ai interagi. Ils sont nombreux à avoir été de bons amis même hors du laboratoire. Merci donc à Clément, Gwenaëlle H., Mathieu, Solène, Arnaud, Philippe, Olivier, Élie, Jules et Pierre. Nos projets divers et divertissants ont grandement contribué à mon équilibre de vie. Un merci particulier à Gwenaëlle H., Mathieu et Clément qui ont donné un nombre significatif d'heures de travail pour m'aider sur des manipulations ou de la rédaction.

Merci à tous les professionnels de recherche et membres de l'équipe technique. On ne dit pas assez combien vous comptez pour nous les étudiants. Que ce soit en fournissant du matériel ou un service, en réparant les pannes ou en apportant un point de vue d'expert sur un problème, vous abattez les barrières dans nos projets. Un projet de l'ampleur de celui décrit ici me semble impossible si l'on devait connaître toutes les machines et passer les commandes personnellement.

Merci à tous mes amis au laboratoire et ailleurs. Vous m'avez fait grandir scientifiquement et humainement. Je n'ai pas la place de tous les nommer ici mais j'adresse un merci particulier à Adham, Julien, Mathilde, Gwenaëlle L. et Romain.

Merci à ma famille pour leur soutien et leur amour indéfectible. Merci à mon groupe scout pour les découvertes, l'émerveillement et les aventures.

Finalement un grand merci à Claude grâce à qui je suis au Québec et j'ai pu faire ce projet. Mon meilleur colloq et soutien, merci pour tout!

TABLE DES MATIÈRES

Introduction.....	1
Chapitre 1: État de l'art	6
1.1) Description des cellules utilisées	6
1.2) Analyse des méthodes de contact existantes	8
1.2) a) Wire bonding	8
1.2) b) Shingling	9
1.2) c) Monolithically Integrated Modules (MIMs)	10
1.3) Circuits électriques optimaux pour les DRA	11
1.4) Revue des cellules à contact face arrière existantes	13
Chapitre 2: Procédés utilisés et cadre théorique	21
2.1) Étapes incontournables du procédé	21
2.2) Techniques de microfabrication envisagées	22
2.2) a) Gravure du via	23
2.2) b) Isolations électriques possibles	28
2.2) c) Métallisation des vias	32
2.2) d) Caractérisation des échantillons	35
Chapitre 3: Méthodologie et conception	39
3.1) Méthodologie suivie pour le développement du procédé	39
3.2) Conception des masques utilisés	42
3.2) a) Description et justification des motifs	42
3.2) b) Interaction entre les étapes	49

Chapitre 4: Description et justification du procédé retenu 52

4.1)	Étapes face avant	52
4.2)	Transfert vers la face arrière	56
4.3)	Gravure du via.....	60
4.3) a)	Gravure SF ₆ du Ge	62
4.3) b)	Gravure des matériaux III-V	65
4.4)	Isolation diélectrique du via	70
4.5)	Métallisation par sérigraphie	77

Chapitre 5: Performances des cellules fabriquées 80

5.1)	Caractérisation des cellules.....	80
5.1) a)	Incompatibilité du montage 1-soleil classique	81
5.1) b)	Création d'un montage 1-soleil adapté.....	82
5.2)	Renforcement de l'isolation	84
5.3)	Mesure de cellules fonctionnelles sous illumination	87
5.4)	Identification des problèmes et corrections	90
5.4) a)	Dégradation des cellules	90
5.4) b)	Identification de l'origine de la déviation	92
5.4) c)	Correction de la déviation	97

Conclusion et perspectives	102
Annexes	106
A. Jeu de masque Hawaii utilisé.....	106
B. Procédé détaillé	114
Bibliographie	130

Table des illustrations

Figure 1-1: Comparaison de l'usage du spectre solaire entre une cellule Si et une triple jonction. Exemple d'empilement de matériaux utilisé pour les triples jonction.....	7
Figure 1-2 : Schéma en vue isométrique d'une cellule qui porte des wire bonds ...	9
Figure 1-3 : Cellules interconnectées par shingling	9
Figure 1-4 : Schéma illustrant une disposition classique d'un MIM	10
Figure 1-5 : Illustration des interconnexions optimales en fonction de la concentration vue par chacune des cellules	12
Figure 1-6 : Illustration d'un EWT	14
Figure 1-7 : Illustration d'une cellule BJ	15
Figure 1-8 : Illustration d'un MWT	16
Figure 1-9 : Procédé pour la fabrication de la cellule à contacts face arrière	17
Figure 1-10 : Process flow de fabrication de la cellule double jonction à MWT .	18
Figure 1-11 : Vue MEB de la cellule à contact face arrière.....	19
Figure 2-1: Schéma des principales étapes du procédé de microfabrication	22
Figure 2-2 : Schéma illustrant la passivation des flancs pour obtenir des profils plus verticaux.....	24
Figure 2-3 : Illustration des étapes nécessaires à la métallisation d'un via avec de la photo résine	29
Figure 2-4 : Schéma des effets d'un écart entre le masque et la résine	31
Figure 2-5 : Motifs dans une résine positive de 20µm d'épaisseur avec différentes positions du masque	32
Figure 2-6 : Image MEB de l'évolution de la métallisation de vias en cuivre en fonction du temps d'electroplacage	34
Figure 2-7 : Graphiques représentant une courbe I-V de cellule triple jonction standard	37

Figure 3-1 : Motifs présents sur le masque Guyane qui ont permis le développement de l'isolation par étalement de résine	41
Figure 3-2 : Niveau TM du jeu de masque Hawaii.....	43
Figure 3-3 : Capture d'écran des motifs TLM utilisés	46
Figure 3-4 : Capture d'écran des capacités de contrôles	47
Figure 3-5 : Schéma en coupe d'une chaîne de 3 vias	47
Figure 3-6 : Capture d'écran montrant le design des marques d'alignement	48
Figure 4-1 : Schémas du substrat initial	53
Figure 4-2 : Schéma d'une cellule métallisée en face avant	54
Figure 4-3 : Paramètres de la recette MJHSiCl qui permet la gravure plasma des matériaux III-V	55
Figure 4-4: Schéma d'une cellule après gravure méso.....	55
Figure 4-5 : Image au microscope optique des perforations laser	57
Figure 4-6 : Vue au microscope optique en mode Nomarski de la déformation de la métallisation provoquée par le via	57
Figure 4-7 : Schémas d'une cellule venant de recevoir sa métallisation de base .	58
Figure 4-8 : Schémas de la cellule avec la face avant terminée.....	59
Figure 4-9 : Vue en coupe au MEB d'un phénomène de micro-masquage des III-V en fond de tranchée sous le masque suspendu	61
Figure 4-10 : Schémas d'une cellule prête pour l'ouverture du via	62
Figure 4-11 : Paramètres de la recette de plasma retenue pour l'ouverture du via dans le Ge par plasma Sf_6	63
Figure 4-12 : Vue au microscope optique de deux tranchées après l'étape de gravure SF_6 du Ge	64
Figure 4-13 : Schémas d'un échantillon après la gravure Ge du via.....	65

Figure 4-14 : Courbe de l'intensité d'émission de la raie de Ga en fonction du temps de procédé écoulé.....	66
Figure 4-15 : Image au microscope optique d'une membrane métallique après gravure III-V du via	67
Figure 4-16 : Images au microscope optique des deux faces d'une même membrane attaquée dont l'aluminium est dégradé.....	68
Figure 4-17 : Équations des 4 réactions chimiques mises en jeu dans le phénomène de corrosion de l'aluminium.....	69
Figure 4-18 : Schémas d'un échantillon après la gravure III-V du via	69
Figure 4-19 : Schémas d'un échantillon dont l'oxyde de protection vient d'être ouvert révélant le contact de base	70
Figure 4-20: Vue MEB en coupe de deux tranchées de 170 μm de profondeur dans du Si. Ces tranchées sont partiellement remplies de résine SU-8	72
Figure 4-21 : Vue en coupe au MEB d'une tranchée remplie de SU-8.	73
Figure 4-22 : Vue MEB en coupe d'un via fonctionnel	76
Figure 4-23: Vue MEB en incidence oblique d'une métallisation sérigraphiée ...	78
Figure 5-1 : Courbe I-V sous obscurité de la première cellule fonctionnelle.	81
Figure 5-2 : Schémas illustrant le positionnement d'une cellule dans le montage 1-soleil classique.....	82
Figure 5-3: Schéma de l'enceinte utilisée et photo de montage réalisé pour la mesure des cellules à contacts face arrière	83
Figure 5-4 : Vue en coupe a MEB illustrant le problème de fissure	85
Figure 5-5 : Schéma illustrant le court-circuit envisagé.....	86
Figure 5-6 : Schéma en coupe des chaînes de vias utilisées	88
Figure 5-7 : Courbes I(V) de 3 cellules solaires sous illumination 1-soleil	89
Figure 5-8 : Courbe I(V) sous obscurité des deux cellules fonctionnelles	90

Figure 5-9 : Électroluminescence des deux cellules fabriquées	91
Figure 5-10 : Vue en coupe au MEB d'un via fonctionnel.....	92
Figure 5-11 : Caractéristique I(V) d'une cellule du deuxième lot avant collage..	94
Figure 5-12 : Comparaison des caractéristiques I(V) sous illumination d'une même cellule selon le montage utilisé	95
Figure 5-13 : Courbes obtenues sous illumination en faisant des mesures en fond de via immédiatement après la gravure plasma.....	96
Figure 5-14 : Schéma simplifié des espèces présentes en fond de via	97
Figure 5-15 : Graphique reprenant 4 caractéristiques I(V) sous illumination de motifs de contrôle de l'échantillon O663A après un bain de 15 minutes de H ₂ O ₂	98
Figure 5-16 : Caractéristiques I(V) sous illumination obtenues en fond de via sur l'échantillon O663A après gravure de 1 min de la middle cell	99
Figure 5-17 : Graphique reprenant les caractéristiques I(V) sous illumination des 3 cellules fonctionnelles mesurées	100
Figure 6-1 : Masque Hawaii, niveau Thick Metal (TM).....	106
Figure 6-2 : Masque Hawaii, niveau Mésa (MS)	107
Figure 6-3 : Masque Hawaii, niveau Base Metal (BM)	108
Figure 6-4 : Masque Hawaii, niveau Via Opening (VO)	109
Figure 6-5 : Masque Hawaii, niveau Dielectric Insulation (DI).....	110
Figure 6-6 : Masque Hawaii, niveau Back Electrode Metal (BEM)	111
Figure 6-7 : Motifs finaux adoptés pour le pochoir de sérigraphie	112
Figure 6-8: Masque Hawaii, niveau Base Opening (BO)	113
Figure 6-9: Schéma étape par étape de l'échantillon. Vue isométrique.	114
Figure 6-10 :Schéma en coupe de l'échantillon étape par étape.....	115
Figure 6-11 :Process flow détaillé étape par étape pour le procédé FFF	129

LISTE DES ACCRONYMES

ALD	Atomic Layer Deposition
AM 1.5 D	Air Mass 1.5 Direct
AR	Anti Reflection Coating
BJ	Back Junction
BOE	Buffered Oxyde Etch
BSF	Back Surface Field
CPV	Concentrated PhotoVoltaïcs
DRA	Dense Receiver Array
EDX	Energy Dispersive X ray spectrometry
EWT	Emitter Wrap Through
FFF	Front Face First
I _{sc}	Courant de court-circuit
ICP	Inductively Coupled Plasma
LCOE	Levelized Cost of Electricity
MEB	Microscope Electronique à Balayage
MIM	Monolithically Interconnected Module
MJSC	Multi Junctions Solar Cell
MWT	Metal Wrap Through
PDMS	PolyDiMéthyl Siloxane
PEB	Post Exposure Bake
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition
PCB	Printed Circuit Board
SSE	Système de Suivi d'Échantillon
TLM	Transmission Line Measurement
V _{oc}	Tension de circuit ouvert
ZCE	Zone de Charge d'Espace

INTRODUCTION

Dans le contexte de la demande croissante en énergie ainsi que du besoin de trouver des sources d'énergie plus respectueuses de l'environnement, la recherche sur les formes d'énergies renouvelables est en pleine expansion. En effet, si la demande d'énergie continue de croître selon les prévisions et que nous voulons maintenir l'énergie à son prix actuel, nous devons faire progresser l'efficacité des méthodes de production d'énergies renouvelables pour pallier l'épuisement des ressources d'énergie fossile qui nous fournissent présentement une grande partie de l'énergie. Pour avancer vers cet objectif l'exploitation de l'énergie solaire semble être une bonne solution. On peut faire usage directement du rayonnement solaire comme source de chaleur (solaire thermique) ou encore utiliser **l'effet photoélectrique**[1] qui permet de produire un courant électrique dans un matériau semi-conducteur exposé à un éclairage extérieur. C'est ce dernier cas auquel nous allons nous intéresser pour cette maîtrise.

Les cellules photovoltaïques (**PV**) les plus courantes sont faites de silicium et atteignent aujourd'hui des rendements de $26.7 \pm 0.5\%$ pour les plus performantes[2], [3] (résultats en laboratoires). Cependant, même si les recherches sont encore assez intensives pour le silicium, on s'approche de la limite théorique d'efficacité imposée par la nature du matériau utilisé (32%). Cette limite a été calculée par **W. Shockley** et **H.J. Queisser** dès 1960[4]. On parle de limite de Shockley-Queisser et celle-ci a été affinée par d'autres contributeurs[5]. Une solution en pleine croissance pour atteindre de plus hautes efficacités consiste à utiliser d'autres matériaux et à les empiler pour faire meilleur usage du spectre solaire. On appelle ces dispositifs "**cellules solaires multi-jonctions**" (**MJSC**). Malheureusement, cette solution est bien plus coûteuse. Effectivement, les matériaux utilisés sont plus rares et la fabrication des cellules est bien plus complexe. Pour cette raison, l'usage de ces MJSC a longtemps été cantonné à l'aérospatial où le poids du matériel embarqué prime souvent sur son coût. Le **Levelized Cost Of Electricity (LCOE)**[6], [7] qui correspond au coût total du dispositif (fabrication, installation, maintenance...) divisé par la quantité d'énergie électrique produite n'était donc pas avantageux pour un développement commercial

terrestre de ces applications. Pour ramener le LCOE dans des limites acceptables, il est possible de concentrer le rayonnement solaire sur les MJSC grâce à des dispositifs optiques dont le coût sera faible devant celui des cellules. On appelle cette approche le **photovoltaïque à concentration (CPV)**.

Une cellule solaire doit être contactée électriquement sur ses deux faces. Le contact de la face avant est appelé **émetteur** et celui de la face arrière est appelé **base**. La base est bien souvent entièrement métallisée et du fait de sa grande surface (toute la face arrière de la cellule) elle est facile à souder sur le module où la cellule est utilisée. L'émetteur en revanche est plus problématique. On doit déposer le moins de métal possible sur la face avant, afin de ne pas bloquer la lumière incidente. Cependant, un compromis doit être fait, car moins on met de métal, plus l'on perd de l'énergie lors du transport des charges vers et dans la métallisation (perte résistive). De ce fait, il faut trouver le bon rapport entre l'ombrage imposé par la métallisation et les pertes résistives dues au transport des charges. Le concept communément utilisé pour cela consiste à déposer deux bandes de métal assez larges (les **bus bars** d'environ 200 μm de large) sur les côtés droit et gauche de la cellule, et de déposer de très fines lignes métalliques (les **grid lines**, ou **fingers**, d'environ 1 à 3 μm de large) sur la surface du dispositif pour canaliser les charges vers les bus bars d'où elles seront extraites. Ces bus bars doivent donc être reliés électriquement au module sur lequel se trouve la MJSC.

Pour effectuer les connexions évoquées ci-dessus trois solutions principales sont utilisées. Elles sont appelées **wire-bonding**, **shingling**[8] et "**Monolithically Integrated Modules**" (**MIMs**)[8], [9]. Le wire-bonding et les sont adaptés pour l'usage dans des modules utilisant des optiques individuelles. En revanche dans ce que l'on appelle un Dense Receiver Array (**DRA**), la lumière est concentrée par un ensemble de miroirs sur une zone que l'on cherche à couvrir le plus efficacement possible de cellules. Les MIMs et le shingling son plus adaptés aux DRA. Ces méthodes, leurs avantages et leurs limitations seront discutés dans la section 1.2).

Le projet décrit dans ce mémoire propose de développer un procédé intégrable à la fabrication des cellules solaires triple jonctions pour effectuer un renvoi du contact émetteur vers la face arrière de la cellule en utilisant des techniques standards de microfabrication. Une telle disposition des contacts de la cellule permettrait un assemblage facile des cellules dans le module CPV. On pourrait aussi envisager les interconnexions complexes entre les cellules tout en ayant un usage optimal de l'aire sur laquelle est concentrée la lumière dans les DRA.

L'objectif principal de ce projet est de proposer et développer un procédé de microfabrication permettant de reporter le contact émetteur sur la face arrière d'une MJSC avec des techniques standard de microfabrication. Dans ce projet, nous allons plus particulièrement nous concentrer sur les MJSC les plus communément utilisées, c'est-à-dire des cellules triple jonction monolithiques à accord de maille (**InGaP, (In)GaAs, Ge**). Il s'agit donc de trouver une réponse à la question de recherche suivante : « **Comment intégrer un renvoi du contact émetteur en face arrière au processus de fabrication des cellules triple jonction ?** »

La réponse prendra la forme d'une cellule fonctionnelle fabriquée avec les équipements de salle blanche, accompagnée du détail du protocole utilisé pour la fabriquer. Ce résultat devra être **facilement réalisable et reproductible** pour assurer le fonctionnement du procédé dans un **environnement industriel** avec un **coût raisonnable**. Ainsi ce projet permettra de répondre à un besoin de l'industrie CPV.

Plus concrètement, **le projet peut être séparé en 4 objectifs intermédiaires subséquents**. Il faut d'abord **proposer un procédé préliminaire** de microfabrication qui permettra de donner les étapes à valider pour réaliser les MJSC à contact face arrière. Par la suite, il faudra **développer expérimentalement les étapes** pour identifier les écueils spécifiques à ce dispositif qui n'ont pas été anticipés. Une fois le procédé modifié et la faisabilité vérifiée, il faudra fabriquer une cellule en accord avec le procédé pour **obtenir un prototype**. Finalement, il faudra **caractériser cette cellule** fabriquée pour s'assurer qu'elle remplit son cahier des charges. Ces résultats constitueront une preuve de concept qui serait, au meilleur de nos connaissances, **la**

première cellule de ce type avec des contacts en face arrière (i.e. une MJSC triple jonction GaInP/(In)GaAs /Ge).

Dans ce mémoire, nous allons d'abord nous intéresser à l'état de l'art pour justifier la pertinence du projet et identifier les stratégies utilisables. On y retrouvera une courte description du fonctionnement théorique d'une cellule photovoltaïque, une analyse des méthodes de contacts existantes avant de se concentrer sur les schémas électriques selon lequel on veut arranger ces interconnexions. Ainsi, on comprendra bien mieux les besoins que ce projet tente de combler. Finalement, à la lumière de ces observations, on analysera les cellules à contact face arrière existantes dans la littérature. On pourra ainsi sélectionner les structures les plus pertinentes pour notre cas ainsi que les défis que nous allons rencontrer. (Chapitre 1: État de l'art)

Forts de ces connaissances on sera capable d'identifier les étapes incontournables du procédé à développer. Il s'agira alors d'explorer les techniques de microfabrication utilisables pour ces étapes et nous en profiterons pour présenter les équipements que nous comptons utiliser et justifier l'adoption ou le rejet de certaines techniques. (Chapitre 2: Procédés utilisés et cadre théorique)

Ensuite, la méthodologie adoptée pour le développement du procédé et la validation de celui-ci seront discutées. On parlera aussi du design utilisé pour les dispositifs. Il s'agit ici de comprendre comment a été bâti le procédé et quelles méthodes de contrôles ont été prévues pour s'assurer d'obtenir toutes les informations possibles sur les dispositifs et leurs performances. (Chapitre 3: Méthodologie et conception)

On pourra alors présenter plus en détail le premier résultat du projet c'est-à-dire le procédé fonctionnel retenu. Les étapes adoptées seront justifiées par une rapide description de tests réalisés et des problèmes rencontrés pour y parvenir. (Chapitre 4: Description et justification du procédé retenu)

Pour finir, les performances électriques des cellules fabriquées seront analysées. On identifiera les points forts et les points faibles dont nous essayerons d'expliquer

l'origine. Les méthodes utilisées pour corriger ces points faibles seront exposées pour apporter une meilleure compréhension des éventuels points faibles. (Chapitre 5: Performances des cellules fabriquées)

On conclura alors en résumant ce que nous avons appris lors de la démonstration de ces premiers prototypes de MJCS à contacts face arrière. On finira avec les travaux à poursuivre et ce que nous pouvons maintenant espérer faire grâce à ce procédé.

CHAPITRE 1: ÉTAT DE L'ART

1.1) Description des cellules utilisées

Nous allons commencer ici par un court résumé du fonctionnement d'une cellule solaire. Une cellule solaire est formée d'une jonction dans un semi-conducteur (frontière séparant deux zones de dopage opposées). La partie supérieure de cette jonction est souvent dopée de type n et sera appelée émetteur. La partie inférieure, alors de type p est appelée base. Lorsqu'un photon d'énergie supérieure au gap du matériau utilisé frappe celui-ci, il peut être absorbé par un électron au repos dans la bande de valence. Cet électron passe dans la bande de conduction (i.e. devient un électron libre) et laisse derrière lui dans la bande de valence un « trou » (manque d'électron qui agit comme une charge positive mobile). Ces porteurs de charges peuvent alors suivre plusieurs mécanismes différents. S'ils sont générés au cœur de la jonction dans la Zone de Charge d'Espace (**ZCE**) ils seront séparés par le champ électrique qui y règne du fait de leurs charges opposées. S'ils sont générés dans les autres parties de la jonction, ils diffuseront simplement dans le matériau jusqu'à la ZCE où ils seront séparés par le champ électrique, ou jusqu'à rencontrer un porteur de charge opposé avec lequel ils pourront se recombiner (émission radiative ou thermique). Cependant, si au cours de son déplacement (après séparation par la ZCE) le porteur rencontre une électrode avant de rencontrer un porteur opposé, il est alors extrait par l'électrode puis circule dans le circuit métallique connecté formant ainsi un courant. Ce court paragraphe présente une version simplifiée d'une cellule simple jonction.

Cependant, les photons d'énergies inférieures au gap ne sont pas absorbés et ceux d'énergies supérieures ne forment pas de porteurs de charge plus performants. Au contraire, l'excès d'énergie est perdu sous forme thermique contribuant ainsi à l'échauffement du dispositif (thermalisation). Les cellules simple jonction de silicium qui sont utilisées dans les panneaux les plus courants peuvent donc être remplacées par des cellules multi-jonctions qui seront constituées de plusieurs jonctions de gap décroissant permettant ainsi moins de pertes par échauffement et moins de photons perdus, car non-absorbés[10]. La Figure 1-1(a) représente un spectre solaire reçu à la

surface de la terre (en gris) auquel est superposé le spectre d'absorption des trois sous-cellules d'une cellule triple jonction. Le spectre correspondant pour une cellule Si est donné dans la Figure 1-1(b) à titre de comparaison. Ce spectre illustre l'intérêt des cellules multi-jonctions, dans lesquelles le spectre est séparé et chaque photon sera ainsi plus proche en énergie du gap de la cellule qui l'absorbe. Ces cellules multi-jonctions permettent donc de plus hautes efficacités maximales, mais demandent des procédés de fabrication plus complexes comme par exemple l'épitanie des jonctions supérieures. Les plus largement utilisées sont les cellules triple-jonction monolithiques à accord de maille sur substrat de Germanium. C'est sur ces cellules en particulier que les manipulations de ce projet seront menées. Un schéma des matériaux utilisés et l'identification de chaque couche est présenté dans la Figure 1-1(c).

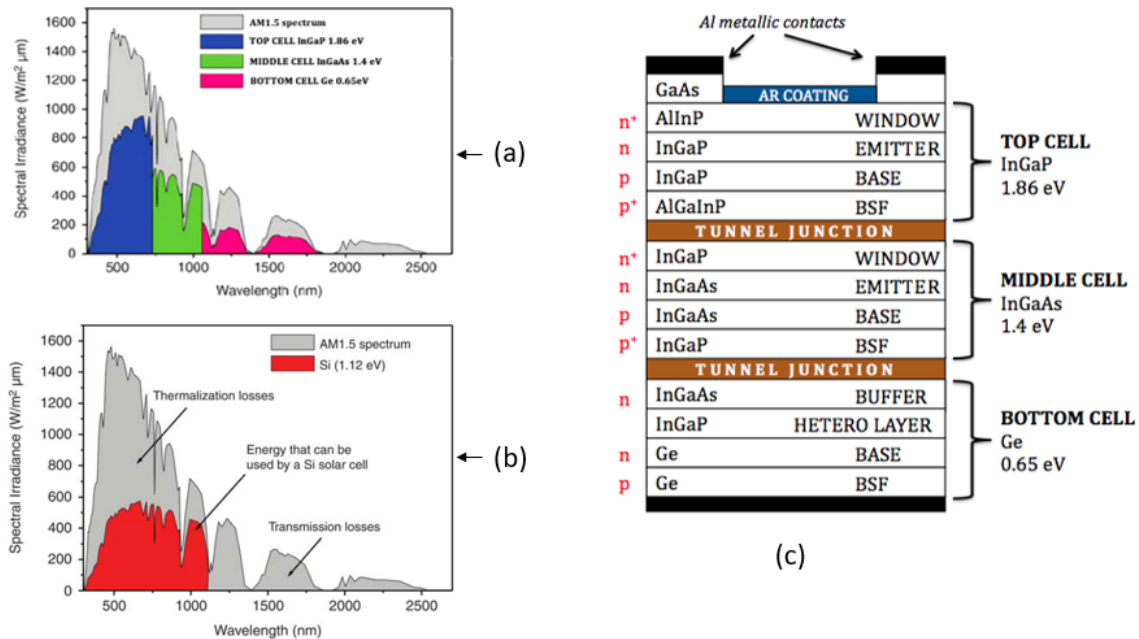


Figure 1-1: Comparaison de l'usage du spectre solaire entre (a) une cellule triple jonction et (b) une cellule Si classique. (c) Exemple de l'empilement de matériaux dans une cellule triple jonction. Images tirées de [10]

Les couches supplémentaires (autre qu'émetteur et base) permettent un fonctionnement optimal de la cellule. Les couches **window** permettent de repousser les trous loin de la surface supérieure de la jonction, les **BSF** (Back surface Field) repoussent les électrons loin de la surface inférieure, les jonctions tunnel assurent une conduction optimale du courant entre deux sous-cellules et la couche supérieure de

GaAs (dite **couche contact**) permet un bon transport des charges vers les électrodes en assurant un contact ohmique avec les métallisations.

1.2) Analyse des méthodes de contact existantes

Précédemment, il a été dit qu'il existait 3 principaux moyens de connecter les cellules considérées au module. On parle des techniques d'interconnexions et non pas des schémas électriques réalisés. Nous allons ici courtement les détailler en analysant les forces et les faiblesses de chacune.

1.2) a) **Wire-bonding**

Le wire-bonding (soudure par fil) est la méthode la plus courante de connexion des cellules. On soude un fil micrométrique sur un bus bar d'un côté et sur le module de l'autre. Une telle cellule est schématisée dans la Figure 1-2. Ce fil est typiquement fait d'un métal ductile et bon conducteur[11] (or ou aluminium). Cette solution est issue directement de techniques éprouvées d'assemblage micro-électronique[12]. Elle est donc disponible industriellement d'où son usage courant. Cependant, elle impose un espacement (environ 0.4mm minimum)[8] entre chacune des cellules du module afin de s'assurer que les bords des cellules n'entrent pas en contact créant un court circuit. Dans le cas d'un module où des lentilles concentrent la lumière cet espacement n'est pas handicapant. Il peut poser des problèmes dans les DRA où l'on essaie de disposer les cellules le plus densément possible sur la zone où la lumière est concentrée.

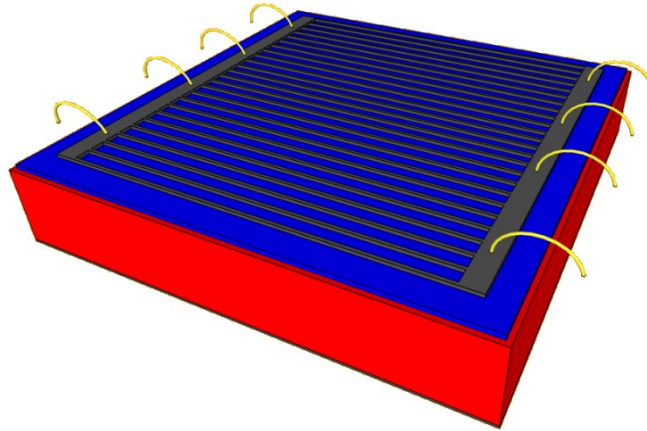


Figure 1-2 : Schéma en vue isométrique d'une cellule qui porte des wire bonds (les fils jaunes). Ceux ci imposent un espacement entre chaque cellule d'au moins 1 fois leur longueur.

1.2) b) Shingling

Le shingling est la méthode qui permet d'atteindre les plus hautes densités de cellules sur le module[8]. Le principe est d'utiliser des cellules ne portant qu'un bus bar. En les faisant se chevaucher, on obtient un contact direct entre la base de la cellule supérieure et l'émetteur de la cellule inférieure (Figure 1-3). En revanche, shingling est une technique d'assemblage complexe qui, au meilleur de nos connaissances, n'est pas industrialisée[13]. Par ailleurs cet agencement force une connexion électrique série entre toutes les cellules d'une ligne ce qui n'est pas optimal[14]–[16] (cf. 1.3)). Finalement, à taille de cellule égale, les porteurs devront parcourir une plus grande distance dans les grid lines pour atteindre les bus bars menant à une augmentation des pertes résistives constatées. En effet, les grid lines sont les parties métalliques de section les plus faibles donc les plus résistives de la cellule.

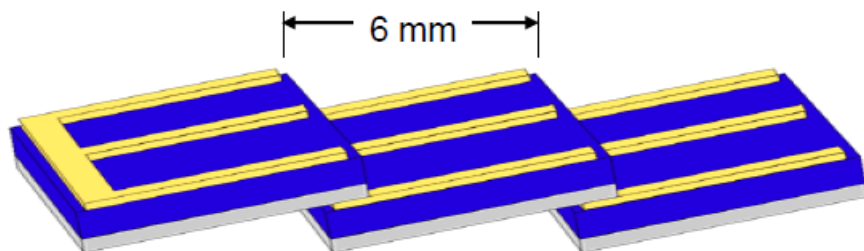


Figure 1-3 : Cellules interconnectées par shingling image tirée de[8]

1.2) c) Monolithically Integrated Modules (MIMs)

L'approche des MIMs présente un très bon compromis entre densité de cellules et souplesse d'interconnexion. Dans ce cas les cellules sont fabriquées sur un substrat semi-isolant et l'ensemble {cellules + substrat} forme le module[8], [9]. (Figure 1-4) Il s'agit ici d'étendre la base sur un côté de la cellule pour pouvoir ensuite connecter la base à la bus bar (émetteur) de la cellule voisine par un simple dépôt métallique[9]. L'intégration de l'interconnexion à la fabrication des cellules permet d'ajouter des mécanismes de réductions des pertes[8], [9] (bypass diode) en cas de dysfonctionnement de l'une des cellules de la rangée. Cependant, un petit espace est quand même perdu entre chacune des cellules et cette approche augmente la complexité de la fabrication des cellules. Par ailleurs, dans le cas des cellules proposées dans cette étude l'usage de MIMs semble complexe, car une étape des MIMs demande l'isolation des cellules les unes par rapport aux autres. Il est plus complexe dans notre cas d'effectuer ces isolations, car notre substrat est conducteur et actif contrairement à ceux utilisés pour les MIMs[9]. Dans notre cas il faudrait donc complètement isoler la cellule par singulation. C'est une approche explorée par un autre membre de mon laboratoire[17].

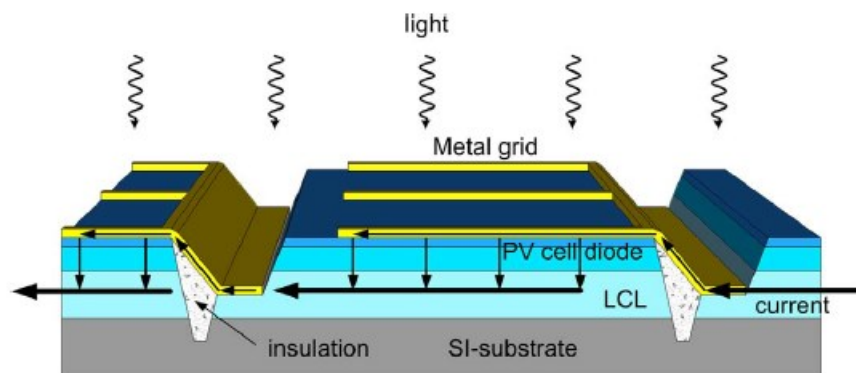


Figure 1-4 : Schéma illustrant une disposition classique d'un MIM. Image tirée de [9]

Dans cette section, nous avons donc exploré et dégagé les intérêts et inconvénients des 3 possibilités d'interconnexion existantes. Si le wire-bonding est bien maîtrisé industriellement, il induit une perte d'espace préjudiciable. Les MIMs sont très prometteurs, mais causent aussi une perte d'espace et sont difficiles à implémenter dans notre cas. Finalement, le shingling est mal maîtrisé et ne permet pas

d'avoir un circuit électronique optimal. Nous allons maintenant détailler ce que nous entendons par "circuit électronique optimal".

1.3) Circuits électriques optimaux pour les DRA

Comme nous l'avons vu en introduction, ce projet est destiné à l'amélioration des DRA, par conséquent il convient d'identifier les problèmes d'interconnexions soulevés par la littérature auxquels ce projet pourrait répondre. Deux interconnexions sont envisageables sur le plan électrique. La connexion des cellules en série permet d'additionner les tensions (V_{oc}) des cellules menant à une plus grande tension en sortie. Cependant, le courant sera celui de la cellule la moins performante de la chaîne. Par conséquent, une cellule fonctionnant peu ou pas pénalisera l'entière de la chaîne réduisant ainsi l'efficacité de chacune des cellules. Ces différentes pertes de performances peuvent avoir de nombreuses causes : ombrage, erreur de suivi du soleil, déviation des performances dues à des variations statistiques du procédé de fabrication, etc.... Au contraire, on peut choisir d'assembler les cellules en parallèle, additionnant ainsi le courant qu'elles génèrent. On a ainsi en sortie un courant très important, mais un voltage faible. Ce courant important peut poser problème, car plus le courant est important, plus les pertes résistives augmentent. En effet, les pertes thermiques par effet Joule sont décrites par l'équation :

$$P = RI^2$$

Avec P la puissance dissipée en W, R la résistance du circuit considéré en Ω et I l'intensité du courant qui le parcourt en A. Comme la puissance dissipée varie avec le carré de l'intensité, il s'agit de ne pas augmenter l'intensité plus que nécessaire. La solution mise en avant par **Steiner M. et al.** [14], [18] est de préférer un assemblage de plusieurs cellules en parallèle, chacun de ces ensembles parallèles étant par la suite relié au suivant en série. On est ainsi capable de baisser le courant produit par le module en augmentant sa tension délivrée, et ce au prix d'une faible perte d'efficacité du module (1% dans leur configuration optimale). Il s'agit donc d'un compromis entre performance et fiabilité car une cellule dysfonctionnelle n'impactera que faiblement les autres.

La validité de cette solution est confirmée par les articles de **Siaw F-L. et al.**[15], [16]. De plus, ceux-ci attirent l'attention sur le fait que la concentration dans les DRA n'est pas toujours homogène et que les ensembles de cellules pourraient dépendre de ces inhomogénéités. La Figure 1-5 illustre leurs résultats. La zone en haut à gauche intitulée (1) représente les facteurs de concentration vus par chacune des cellules, et la couleur représente l'ensemble parallèle auquel la cellule a été affectée. La zone en bas à gauche est un diagramme en barre représentant les performances de chaque ensemble de cellules et qui montre l'accord de courant entre chacun. Finalement, le tableau (à droite, intitulé (3)) indique les résultats électriques de leur module et le fort gain de performances qu'ils ont été capable de réaliser par rapport à des modules conventionnels. La puissance délivrée est 34% plus élevée après l'application de leur stratégie d'interconnexion.

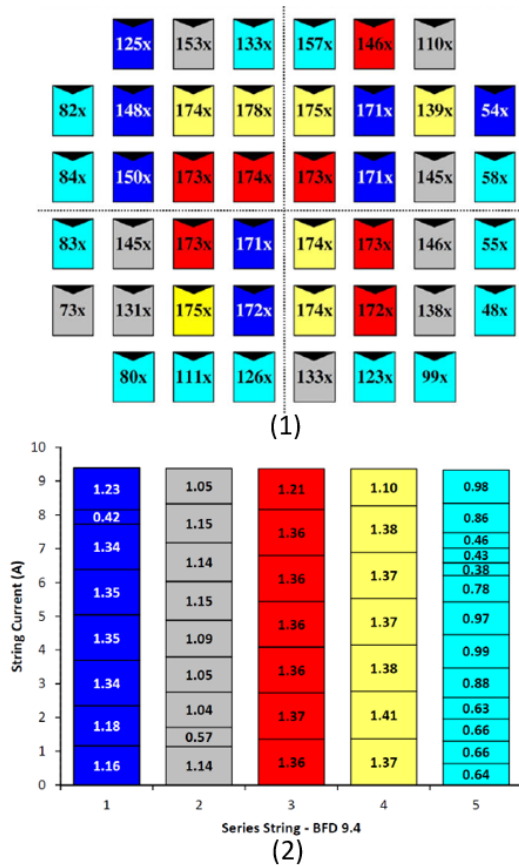


TABLE I
PERFORMANCE COMPARISON OF THE OPTIMIZED ARRAY TO TWO
OTHER ARRAYS WITH CONVENTIONAL ARRANGEMENTS

Array configuration	P_{mp} (W)	Fill factor (FF) (%)	V_{mp} (V)	I_{mp} (A)
22 × 2 - TCT	86.08	49.84	58.65	1.47
6 × 8 - TCT*	83.99	55.14	15.87	5.29
Optimised array using BFD 9.4A arrangement – TCT	112.91	83.62	12.75	8.85

* Four strings that consist of eight CPV cells are series-connected to two (top and bottom) strings that only has six CPV cells

(3)

Figure 1-5 : Illustration des travaux de **Siaw F-L. et al** sur les interconnexions optimales en fonction de la concentration vue par chacune des cellules. Images tirées de [15]

Cependant on notera que ces 3 articles sont le résultat de simulations. Celles-ci ne sont confirmées par des mesures in situ[16] dans un seul des quatre articles. Ils ne proposent pas de solution viable pour l'assemblage physique du module (dans l'article[16] de **Siaw F-L. et al.** le module est assemblé à la main par wire-bonding qui sacrifie donc la densité des cellules). Les schémas électriques complexes décrits ici demandent donc la création de nouvelles méthodes d'assemblage physiques. Celle-ci doivent permettre un branchement série ou parallèle entre chaque cellule individuelle. Les cellules à contact face arrière ouvrent cette possibilité, car il devient possible de contacter toutes les cellules côte à côte sur le module de manière identique. C'est alors dans le module qu'on s'occupera du schéma électrique à réaliser, à la manière d'un PCB.

Dans cette section on a justifié le potentiel des cellules à contact face arrière permettant des interconnexions plus souples, ce qui seraient un atout pour les DRA. Nous allons maintenant analyser les publications portant sur des cellules à contact face arrière. On pourra ainsi dégager les grandes stratégies envisageables pour notre cas.

1.4) Revue des cellules à contact face arrière existantes

L'idée des cellules PV à contact face arrière n'est pas nouvelle. Les cellules mono-jonction Si adoptant une telle architecture sont nombreuses[19] et la littérature recense plusieurs cellules multi jonctions à contact face arrière[20]–[25]. En revanche, au meilleur de nos connaissances, aucune cellule III-V/Ge à contact face arrière n'a jamais été fabriquée. Nous allons donc ici traiter des stratégies adoptées pour fabriquer des cellules solaires à contact face arrière, puis plus précisément des méthodes qui ont pu être développées pour des architectures similaires. Ainsi on sera capable de lister des étapes incontournables pour mener ce procédé à bien.

Commençons par l'article **Emmanuel Van Kerschaver et Guy Beaucarne**[19]. Celui-ci passe en revue la littérature existante et dégage les trois approches principales utilisées pour effectuer ce renvoi. Il traite de cellules Si simple jonction. Nous allons cependant voir quelles techniques nous pouvons réutiliser dans notre architecture, et le cas échéant quelles modifications sont nécessaires.

Une première approche considérée par l'article est appelée Emitter Wrap-Through (**EWT**). Il s'agit ici de percer des vias cylindriques au travers du substrat. Par la suite on dope les surfaces exposées (face supérieure, vias et une partie de la face arrière) avec un dopant de type n. On forme ainsi un émetteur qui s'étend de manière continue de la face supérieure à la face inférieure du dispositif (Figure 1-6). Cette stratégie ne semble cependant pas envisageable dans le cas d'une MJSC. En effet, les deux jonctions supérieures étant obtenues par épitaxie, on ne parviendra pas ici à faire le dépôt à l'intérieur d'un via pour un coût acceptable.

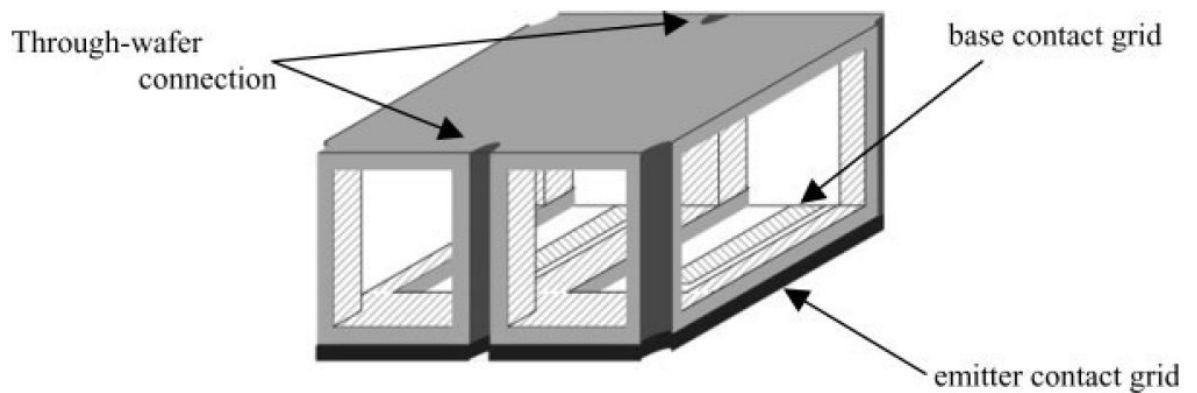


Figure 1-6 : Illustration d'un EWT. Image tirée de [19]

La deuxième approche recensée par leurs article est intitulée Back Junction (**BJ**). Il s'agit ici de former la totalité de l'émetteur sur une partie de la face arrière. Pour ce faire, une partie de la face arrière est dopée puis couverte de métal pour former l'émetteur avec une architecture interdigitée entre les zones formant la base et celle formant l'émetteur (Figure 1-7). Encore une fois, cela semble impossible dans notre configuration. Il serait possible de reproduire la même disposition base/émetteur en utilisant la face épitaxiée comme face arrière. En revanche, dans notre cas l'ordre dans lequel la lumière frappe les jonctions a une grande importance. En effet, le substrat de Ge absorberait la majorité des photons incidents d'énergie supérieurs à son gap, empêchant par là même la génération photoélectrique dans les jonctions suivantes[1] (dont les gaps sont plus grands). Si les jonctions suivantes ne produisent pas de courant,

la jonction de Ge ne pourra pas transmettre celui qu'elle produit qui sera alors perdu[1]. Qui plus est, les porteurs générés dans le Ge auraient une forte énergie qu'ils perdraient par thermalisation. Par conséquent, à moins de changer l'empilement de matériaux et le substrat, cette approche n'est pas envisageable.

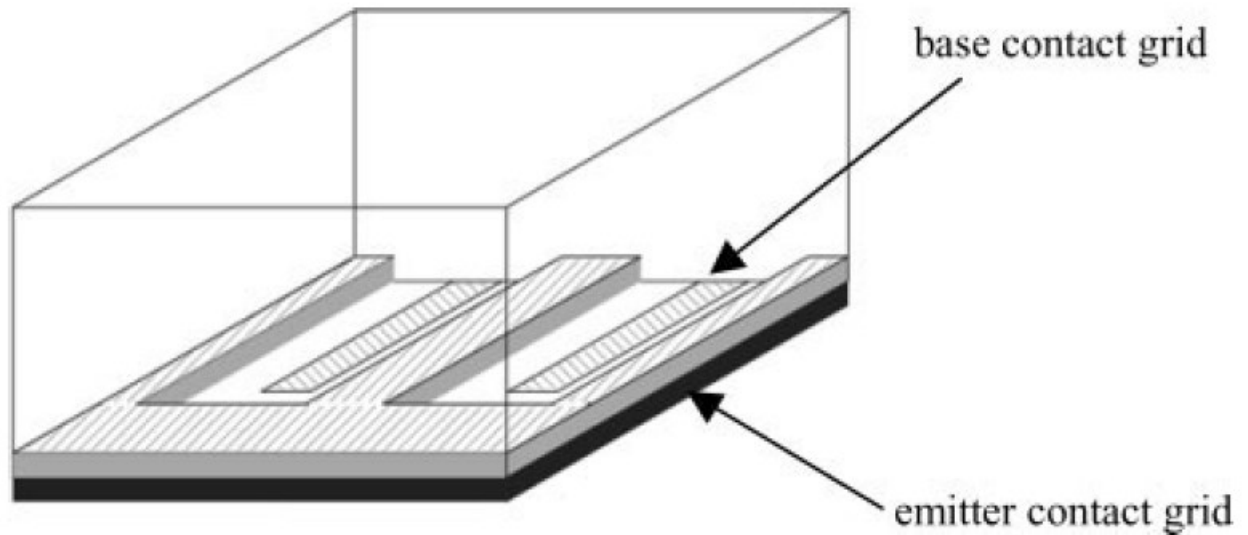


Figure 1-7 : Illustration d'une cellule BJ. Image tirée de [19]

Finalement, la dernière approche étudiée par l'article [19] concerne la technique de Metallisation Wrap Through (**MWT**) (cf Figure 1-8). Dans cette méthode, des vias sont creusés au travers du wafer puis l'émetteur est formé par diffusion (c'est jusqu'ici la même approche que pour l'EWT). Ces vias sont ensuite métallisés assurant ainsi une connexion métallique entre les grid lines en face avant et le pad de soudure en face arrière. La technique de MWT pourrait quant à elle être utilisée dans notre cas moyennant quelques ajustements. Comme discuté précédemment, pour les MJSC, on ne peut pas envisager la diffusion de l'émetteur sur les flancs du via. Par contre, comme proposé dans les brevets[22], [23] de **Fidaner et al.**, on peut graver des vias et, au lieu de diffuser l'émetteur sur leurs flancs on isolerait d'abord électriquement les flancs de ces vias. Déposer un métal conducteur dans ces vias permet alors le renvoi de la métallisation avant sur la face arrière. L'isolation des flancs du via est capitale pour éviter de former un court-circuit entre la face avant et arrière du dispositif. Malheureusement, leurs brevets ne font que décrire l'idée et la structure envisagée,

mais aucun dispositif n'a été fabriqué. Nous verrons plus tard que leurs conclusions concordent avec le procédé envisagé ici.

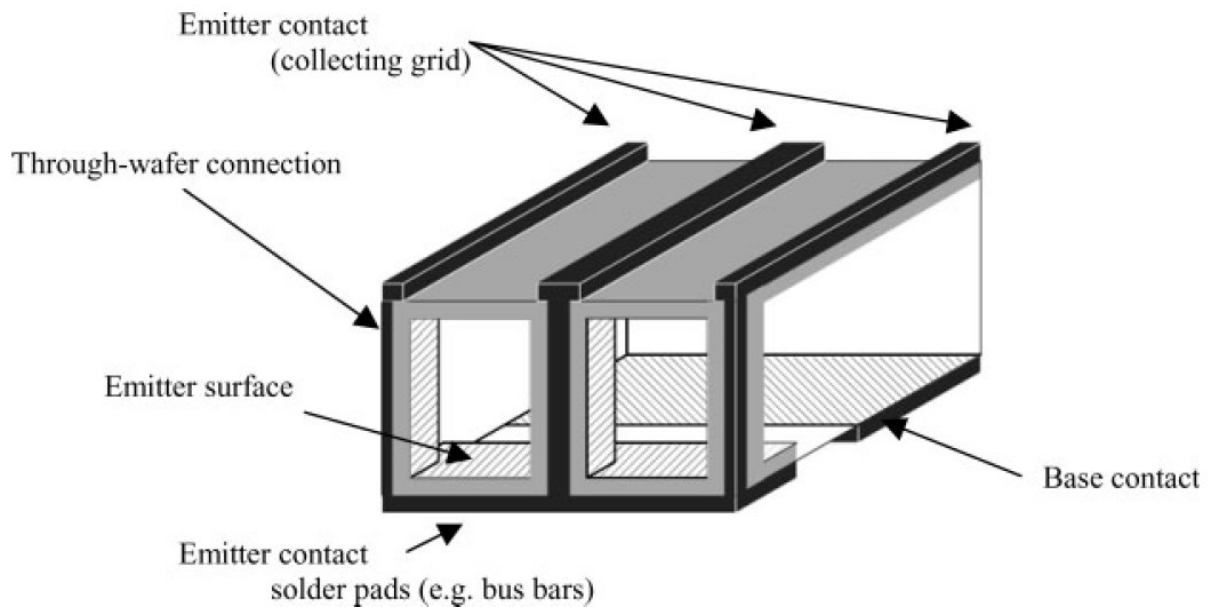


Figure 1-8 : Illustration d'un MWT. Image tirée de [19]

Cependant, certaines MJSC à contacts face arrière ont déjà été fabriquées par d'autres laboratoires pour des structures différentes de la nôtre [20], [21], [24], [25] (matériaux différents, nombre de jonctions différent...). On peut par exemple s'intéresser à la cellule présentée dans les deux premiers articles[24], [25]. Dans ces cas, les auteurs ont utilisé une astuce pour ne pas devoir creuser de vias au travers de toute la cellule, s'épargnant par là même le processus d'isolation des flancs du via qui s'avérera complexe dans notre cas même si le rapport d'aspect des vias est faible (environ 0.5). Ce paramètre est défini comme la profondeur du via par rapport au diamètre de l'ouverture. Afin de s'éviter ces contraintes, les auteurs ont fabriqué la MJSC par épitaxie de l'ensemble des couches sur une substrat semi-isolant (trois jonctions). On notera ici la présence d'une couche de contact à la base de la cellule. (Figure 1-9). Des vias non-traversants sont creusés dans le substrat par gravure plasma au Chlore. Les flancs de la cellule sont alors isolés par dépôt d'un polymère isolant. Finalement, de l'or est déposé par électroplacage pour remplir les vias dans le substrat, et établir le contact entre la base et le via d'un côté, et entre la bus bar et l'autre via de

l'autre côté. Cette architecture n'est pas sans rappeler celle utilisées pour les MIMs, car ici aussi la cellule est crue sur un substrat qui ne fait pas partie de la zone active. Le contact métallique de l'émetteur repose sur le côté de la cellule (préalablement isolé par polymère photosensible). Celui de la base s'étend sur le côté en dehors de la cellule. Par ailleurs, le procédé ne s'arrête pas là, car les vias non traversants ne peuvent transmettre le courant en face arrière. Une étape d'aminçissement (par lapping) est nécessaire ici pour exposer les vias sur la face arrière. Finalement les métallisations arrière sont déposées une fois les vias révélés. Ces articles présentent donc une astuce élégante pour permettre un contact face arrière, mais une des contraintes majeures pour pouvoir l'appliquer est d'avoir un substrat semi-isolant. Dans le cas des cellules triple jonctions auxquelles l'on s'intéresse ici, le substrat est une zone active rendant cette approche impossible sans isolation du via. On reste donc contraint d'isoler les vias que l'on pourrait vouloir creuser. Cependant, cet article contient des informations de procédés qui nous seront utiles plus tard.

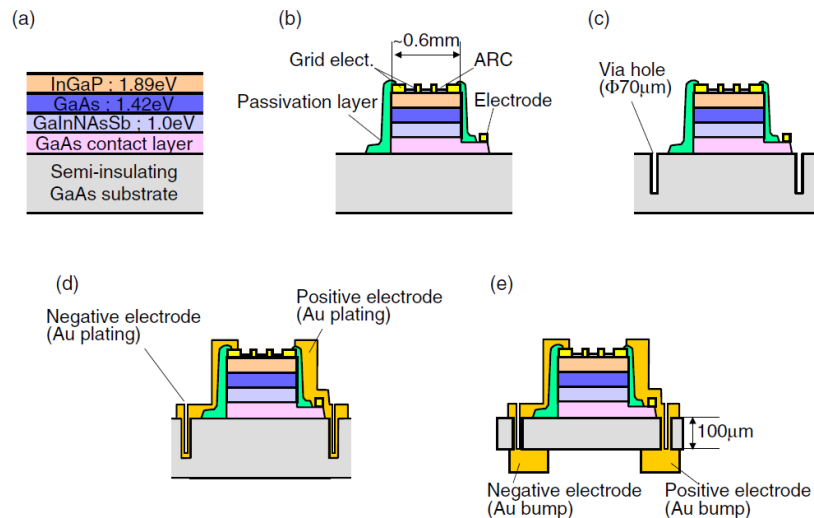


Figure 1-9 : Process flow pour la fabrication de la cellule à contacts face arrière. Image tirée de [24]

Une autre MJSC à contact arrière décrite dans les articles [20], [21] cités plus tôt présente un schéma plus similaire à notre projet. En effet, ici le via est creusé au travers de l'ensemble des couches actives du dispositif (Figure 1-10). Ils gravent les vias depuis la future face arrière du dispositif. Il est donc isolé électriquement grâce au dépôt de couches d'oxyde et de nitrure de silicium puis d'une couche de TiN faisant

office de barrière à la diffusion du Cu. Une fois le via métallisé par plaquage le dispositif est décollé et recollé sur son substrat définitif. La Figure 1-11 est une vue en coupe au MEB d'une cellule terminée. On y voit les différentes couches et leur via (là où il est écrit "electroplated copper"). La cellule est une double jonction dont seules les couches épitaxiées sont conservées. Le substrat utilisé pour la croissance est supprimé après report sur un superstrat de Si. Il est pertinent de relever que le rapport d'aspect de leur via est proche de 2. La conformité du dépôt d'isolant est par conséquent assez facile à garantir. Malheureusement, quoique fonctionnel et encourageant, ce procédé n'a pas été adapté à nos cellules triple jonctions (InGaP/(In)GaAs/Ge) notamment à cause des différences de dimensions considérées. Leur via ne fait qu'une dizaine de microns de profondeur avec des flancs droits contre 18 fois plus dans notre cas, car le substrat est épais de 170 μm . De plus les flancs de nos vias seront courbes.

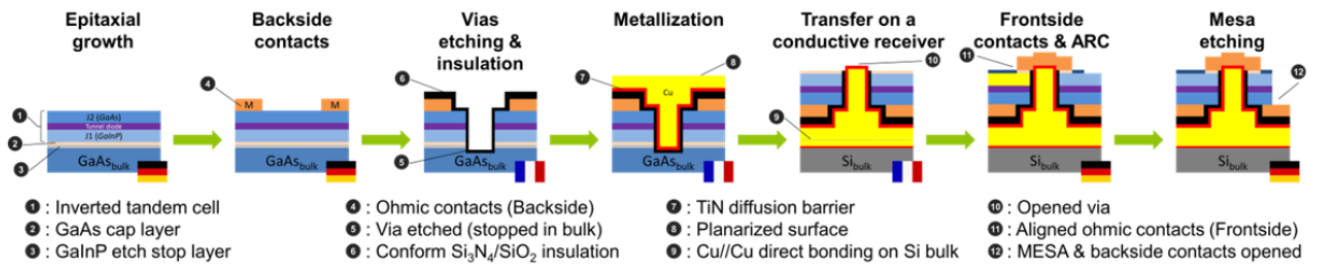


Figure 1-10 : Process flow de fabrication de la cellule double jonction à MWT. Image tirée de [20]

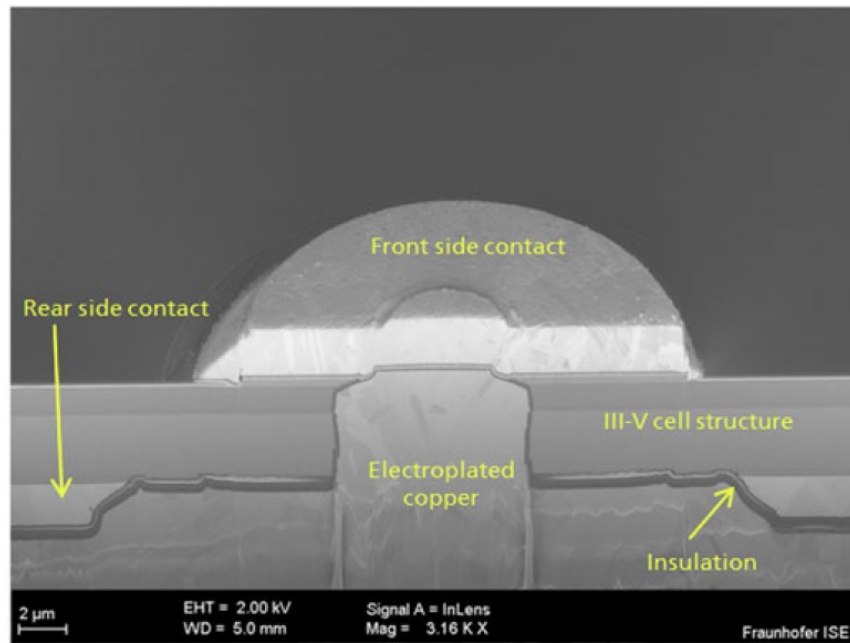


Figure 1-11 : Vue MEB de la cellule à contact face arrière produite présentée dans les articles (21,22)

Certains membres de mon laboratoire explorent la fabrication d'une telle cellule. Le projet de **De Lafontaine M.**[26], [27] consiste en effet à effectuer ce renvoi. Il veut par ailleurs se débarrasser des métallisations de la face supérieure par la même occasion à l'aide d'une matrice de vias micrométriques. La pertinence de cette approche a été confirmée par une étude de **Richard O. et al.**[28] dans laquelle ils simulent les résultats attendus pour cette architecture. Les résultats sont très prometteurs et l'absence d'ombrage causé par la métallisation supérieure devrait provoquer une augmentation de l'efficacité pouvant aller jusqu'à 3% en absolu. Cependant, la complexité du processus nécessaire à la fabrication d'une telle cellule rend le processus coûteux. Le projet décrit dans ce document se pose donc comme une alternative plus facile et donc moins chère pour le renvoi du contact émetteur en face arrière. En revanche, la cellule éventuellement fabriquée ne devrait pas présenter d'amélioration d'efficacité.

Cette partie montre que la fabrication de cellules triple jonctions (InGaP/(In)GaAs/Ge) à contact face arrière a déjà été étudiée, et est possible sur le plan théorique. Cependant, au meilleur de nos connaissances, ces cellules n'ont jamais été fabriquées en pratique ce qui justifie la pertinence de ce projet (sur cette architecture spécifique).

CHAPITRE 2: PROCÉDÉS UTILISÉS ET CADRE THÉORIQUE

À la lumière des exemples de cellules à contact face arrière traités dans la partie précédente, certaines étapes s'imposent et forment une première version sommaire du procédé de fabrication. On cherche à obtenir un via de grandes dimensions (environ $400 \times 200 \mu\text{m}^2$) au centre de chaque cellule. Ce via, isolé et métallisé permettra le transport des charges vers la face arrière. Après avoir listé les principales étapes nécessaires on analysera les techniques de microfabrication qui s'offrent à nous pour les réaliser. Après avoir listé ces techniques, leurs forces et les faiblesses, on indiquera celle qui ont été choisies. On approfondira alors succinctement leur fonctionnement théorique ainsi que le matériel utilisé pour les réaliser.

2.1) Étapes incontournables du procédé

Ces étapes sont schématisées dans l'ordre d'arrivée sur la Figure 2-1. On commence notre procédé de fabrication avec un substrat de Germanium portant déjà les matériaux III-V épitaxiés pour former les deux jonctions supérieures Figure 2-1 (a). Les premières étapes correspondent à la fabrication de la face avant d'une cellule standard (b). La bibliographie n'est pas détaillée ici, car les procédés sont déjà stabilisés par notre laboratoire et ne nécessitent pas de changement. Nous les détaillerons dans la section 4.1). La face avant est collée sur une lame de quartz à l'aide de PDMS. On peut alors travailler sur la face arrière. On commence par l'ouverture d'un via au travers de la cellule. Pour ce faire, la gravure plasma a été sélectionnée. L'attaque se fait depuis la face arrière (base du dispositif). Le profil de l'ouverture de via représenté sur le schéma de la Figure 2-1 (c) est représentatif du profil réel obtenu, bien que pas à l'échelle. Nous devons ensuite isoler les flancs de ce via électriquement ce qui est illustré en Figure 2-1 (d). Il s'agit de s'assurer que le courant ne puisse pas circuler entre l'intérieur du via et le substrat, ce qui provoquerait un court-circuit. En effet, l'étape suivante est de métalliser le via, comme représenté sur la Figure 2-1(e), pour permettre le passage du courant et ainsi prendre le contact émetteur. De

nombreuses autres étapes seront bien sûr nécessaires, mais ces 3 étapes sont complexes et méritent un développement (ouverture du via (c), isolation (d), métallisation (e)). Dans la suite de ce chapitre, nous explorerons les techniques qui s'offrent à nous pour les réaliser, et nous discuterons les avantages et inconvénients de chacune avant de justifier le choix que l'on a fait.

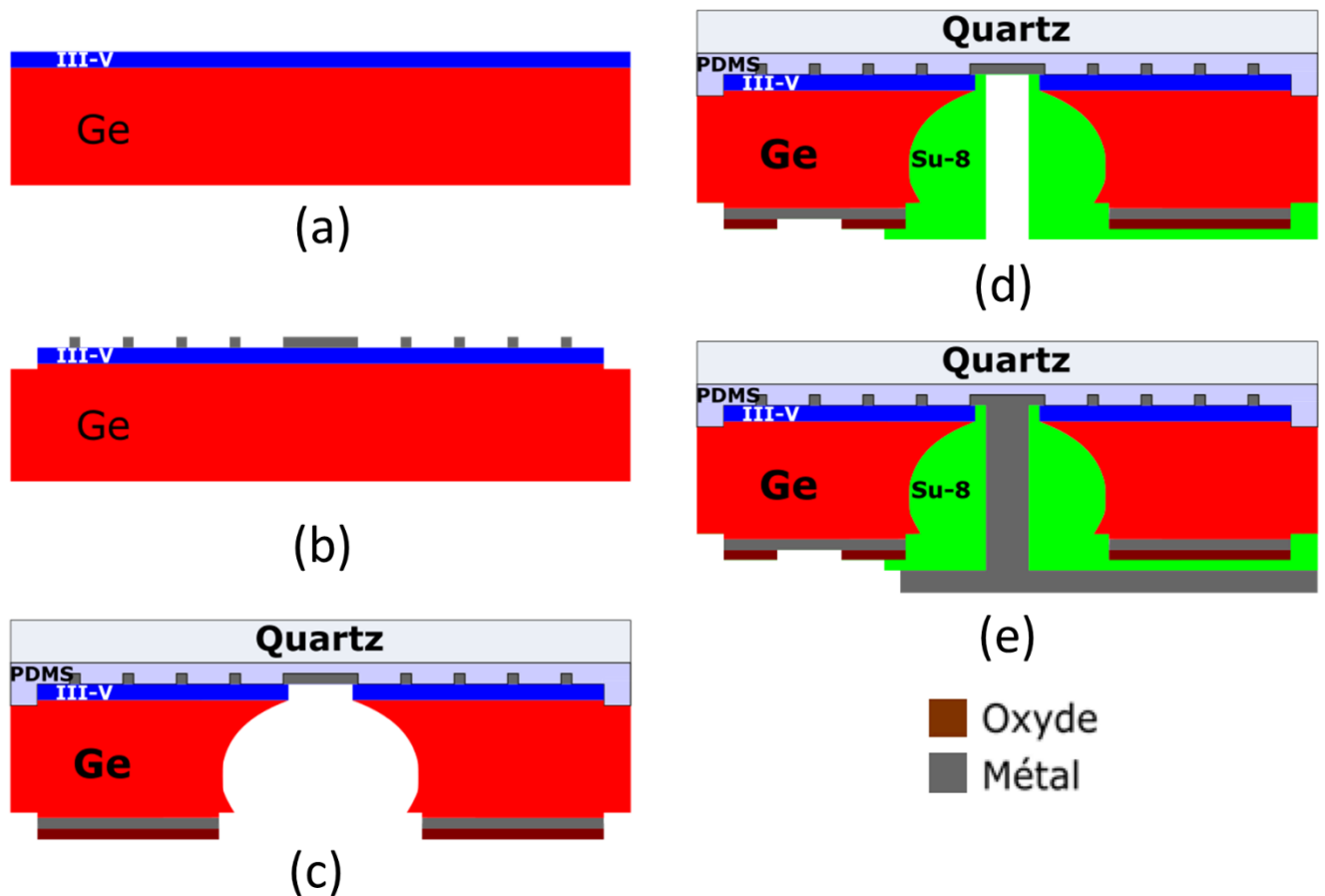


Figure 2-1: Schéma des principales étapes du procédé de microfabrication. Vue en coupe du dispositif (coupe au travers du via) (a) Substrat initial, (b) Étapes standard face avant, (c) Ouverture du via par gravure plasma, (d) Isolation électrique des flancs par résine photosensible, (e) Métallisation du via

2.2) Techniques de microfabrication envisagées

Dans cette partie, nous allons passer en revue les solutions technologiques à notre disposition pour effectuer les différentes étapes nécessaires à la fabrication de

notre cellule. Nous allons les traiter dans l'ordre dans l'ordre chronologique d'apparition dans le procédé envisagé. Ce procédé est détaillé en Annexe B.

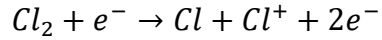
2.2) a) Gravure du via

La première étape sera d'ouvrir le via par lequel on veut faire passer ce renvoi. On commencera donc par une analyse des options de gravure qui s'offrent à nous. Les techniques usuelles de microfabrication opposent deux approches de gravure : la gravure humide et la gravure sèche. Pour la gravure humide, on immerge notre échantillon dans un produit chimique qui attaquera les matériaux avec lesquels la réaction est favorable. La gravure sèche propose d'utiliser un plasma pour graver l'échantillon. C'est une solution généralement plus coûteuse, mais qui permet des résultats plus précis, car on contrôle l'anisotropie de la gravure. Le plasma permet d'obtenir des profils verticaux qui seront souvent préférables. Une méthode pour graver les matériaux III-V par plasma ayant déjà été développée dans notre laboratoire par **Mathieu De Lafontaine**[27], on privilégie ici la gravure plasma. En effet, la gravure humide de chacune des couches épitaxiées peut se révéler complexe, car il faudrait une succession de solutions sélectives pour ne graver qu'une couche à la fois. Nous ne tenterons pas ici de répondre à ce défi qui représente un projet à part entière.

On commencera donc par expliquer succinctement la théorie de la gravure plasma. On présentera le réacteur disponible pour nos gravures et on détaillera nos options en termes de chimie ainsi que les paramètres que l'on peut modifier.

2.2) a) i. Gravure plasma

La gravure plasma consiste à introduire dans une chambre sous vide des gaz réactifs que l'on excitera à l'aide d'un champ électro-magnétique intense, formant ainsi un plasma. Les atomes de ces gaz vont subir différentes transformations qui vont permettre la gravure. Prenons l'exemple du Cl_2 . Certaines molécules seront transformées en radicaux libres, notés $\text{Cl}\cdot$, qui seront extrêmement réactifs. Ils vont se combiner avec des molécules de la surface à graver pour former des composés volatils. D'autres molécules subiront l'arrachage d'un électron se transformant ainsi en ions :



Ces ions peuvent être accélérés par le champ électrique et vont bombarder la surface de l'échantillon. Ce bombardement est très directionnel, car tous les ions sont accélérés dans le même sens (orthogonalement à l'interface plasma-échantillon donc verticalement vers l'échantillon).

On voit que ces deux mécanismes font de la gravure plasma un procédé de gravure à la fois chimique par les radicaux et physique par le bombardement. La prépondérance d'un facteur par rapport à l'autre peut permettre de contrôler l'anisotropie de la gravure. On peut encore améliorer la verticalité des flancs par un dépôt simultané d'une espèce qui fera barrière à la gravure chimique. Les surfaces exposées au bombardement (fond des motifs) verront leur passivation arrachée par le bombardement alors que les flancs garderont leur passivation. Ainsi, la gravure continuera, mais uniquement au fond du motif (Figure 2-2).

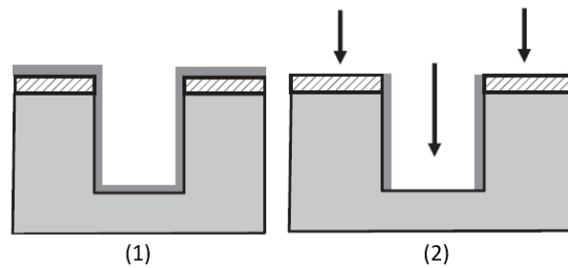


Figure 2-2 : Schéma illustrant la passivation des flancs pour obtenir des profils plus verticaux. Illustration tirée de [11]

Dans notre cas, l'équipement utilisé sera la machine STS III-V, un réacteur générant un Plasma Couplé par Induction (**ICP**). Plus concrètement, cela signifie que le plasma est généré par une inductance à une fréquence de 13,56 MHz. Les gaz sont introduits dans la chambre avec un débit contrôlé. Une fois la pression et le flux de gaz stabilisés, le plasma est généré. Il est aussi possible de polariser la platine sur laquelle est déposé le wafer ce qui permettra notamment d'intensifier l'effet du bombardement ionique en accélérant davantage les ions. La pression dans la chambre peut être contrôlée par deux méthodes. On peut indiquer la pression désirée et la machine règlera

l'ouverture de la valve nommée APC pour extraire la quantité adéquate de gaz. Inversement, on peut indiquer l'ouverture désirée pour cette valve. Dès lors, la pression sera définie par la quantité d'espèces introduites et générées dans le plasma. Finalement, notre échantillon est refroidi par un flux d'hélium en face arrière. Cette température peut aussi être réglée ce qui agira surtout sur l'aspect chimique de la gravure en rendant les sous-produits plus ou moins volatiles.

Dans le procédé retenu, la gravure du *via* se fait depuis la face arrière. Nous allons d'abord nous focaliser sur l'étude de la gravure du Ge (substrat) avant de traiter celle des matériaux III-V (couches épitaxiées). La gravure actuellement prévue pour le Ge est isotrope. En effet, comme la majorité du substrat est inactif dans la génération de porteurs, on peut retirer une grande quantité de Ge. Qui plus est, cette sous-cellule produit généralement du courant en excès. Pour finir, l'ouverture plus large atteinte nous aidera pour l'étalement d'isolant. D'après l'article de **Shim et al.**[29], le Ge peut être gravé par plusieurs gaz avec des chimies basées sur le fluor, le brome ou le chlore. La chimie fluorée (SF_6) permet la gravure la plus isotrope, car l'effet du bombardement ionique y est plus faible. De plus, nous verrons plus tard que le SF_6 ne fait pas partie des chimies reconnues pour graver les matériaux III-V. On peut donc penser que l'usage de la chimie SF_6 permette d'utiliser les matériaux III-V comme "couche d'arrêt". On entend par là une couche inaffectée par le plasma qui restera intacte même en cas de sur-gravure.

Par ailleurs, la chimie SF_6 permet d'atteindre des plus hauts taux de gravures que les deux autres chimies évoquées. L'article sur la gravure anisotrope du Ge par **Darnon et al.**[30] confirme d'ailleurs l'efficacité et l'isotropie de cette chimie. L'anisotropie peut alors être atteinte grâce au multiplexage du plasma (alternance gravure-dépôt de couche passivante). **Shim et al.** mentionnent que la vitesse de gravure peut être augmentée par un accroissement du débit de gaz ou de la puissance de couplage ou encore par une baisse de la pression de la chambre. Une autre conclusion pertinente de l'article est la mise en évidence d'un contrôle sur la rugosité de la gravure. Pour atteindre des surfaces gravées plus lisses, ils suggèrent de baisser la puissance appliquée par l'inductance, le débit de gaz ou la pression, permettant ainsi

une baisse des dépôts fluorés responsables du micro masquage. En revanche ces réglages tendent à ralentir la gravure il nous faudra donc trouver un compromis. **Shim et al.**[29] utilisent dans leur laboratoire une machine ICP. Cela fait de cet article une base très intéressante pour le projet décrit ici, car comme nous l'avons vu, notre machine est aussi un réacteur ICP. À partir de ces références, une recette de gravure a été développée. Nous la détaillerons dans la 4.3).

Une fois la gravure isotrope de Ge effectuée, il faudra graver les matériaux III-V. Pour ces matériaux, il a été choisi de se diriger vers une gravure anisotrope en se reposant sur les travaux de **De Lafontaine M.**[26], [27]. En effet, il a déjà développé un procédé de gravure pour cet empilement de matériaux. Il a fait le choix d'utiliser une gravure basée sur le Chlore. De nombreuses autres chimies permettent de s'attaquer aux matériaux III-V comme en témoigne l'article de **Asakawa K. et al.**[31] Cependant, le chlore se pose comme une bonne base dans notre cas. Comme le souligne **De Lafontaine M.**[27] le taux de gravure est plus élevé que pour les autres chimies envisageables et les flancs du via obtenus sont plus lisses. Il ne semble pas pertinent ici de conduire tous les tests à nouveau et nous allons graver directement avec la recette $\text{SiCl}_4/\text{Cl}_2/\text{H}_2$ développé par **De Lafontaine M.** Cette recette utilise un dépôt à base de Si pour passiver les flancs et améliorer l'anisotropie (dépôt possible grâce au SiCl_4). Notons cependant que comme relevé dans tous les articles cités dans cette partie, la gravure de la sous-cellule supérieure sera plus complexe, car elle contient de l'InP. Les sous-produits de réaction du plasma de chlore dans ce cas sont très peu volatils et leur évacuation peut poser problème. En cas de difficultés pour graver cette couche par plasma on faudrait peut-être se pencher sur la gravure humide.

2.2) a) ii. Méthode de gravure humide comme alternative

Comme on vient de le voir, la gravure plasma de l'InP se révèle être complexe à température ambiante. Il s'avère néanmoins que HCl est une solution de gravure sélective de l'InP par rapport aux autres matériaux III-V mis en jeu[32]–[34]. En effet, comme **Hjort** le souligne dans sa revue de la littérature[32], l'InP est rapidement gravé dans HCl alors qu'au contraire, GaAs n'est pas attaqué. Ce résultat est confirmé par

De Lafontaine M.[34] où HCl est utilisé pour graver la première sous-cellule sélectivement par rapport aux autres précisément sur la structure de MJSC visée par ce projet. En revanche, si l'on décide de faire la gravure de la première sous-cellule par voie humide nous allons avoir la couche de contact restante au fond du via que nous aurons creusé. Idéalement on voudrait éviter cette perte résistive. Il conviendrait alors d'utiliser la solution déjà développée dans mon laboratoire pour la graver ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{NH}_4\text{OH}/\text{H}_2\text{O}$ 9/9/240).

Ici on n'a parlé que de la première top cell, mais il serait bien sûr possible de graver les autres par voie humide si l'on compte se débarrasser du plasma. La deuxième cellule (middle cell), est faite de Ga(In)As. La parenthèse indique que la fraction d'indium est extrêmement faible. Cette sous-cellule est donc aussi gravée par le bain de gravure de la couche contact ainsi que par un bain récemment développé dans notre laboratoire ($\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ 1:10:20). Finalement, le substrat de Ge peut simplement être gravé par H_2O_2 , mais cette gravure est lente ($\sim 17\text{nm}/\text{min}$).

Pour finir une solution capable de graver toutes les couches de III-V en une fois a également été développée dans mon laboratoire[35]. À base de dibrome dans du méthanol, cette solution n'est pas utilisée dans ce projet. Le problème réside dans son agressivité pour les métallisations ainsi que dans notre incapacité à développer un masque sans défaut qui résiste à cette solution. Par ailleurs, cette solution, parfois utilisée pour d'autres applications, est dangereuse[36].

Dans ces deux paragraphes nous avons vu comment nous pourrions graver le via nécessaire au renvoi de contact à effectuer. Pour ce faire on utiliserait la machine de gravure plasma ICP disponible en salle blanche et l'on procéderait à une gravure en deux temps. Premièrement, le Ge serait ouvert isotropiquement par l'usage d'un plasma SF_6 permettant un arrêt net sur la couche de nucléation en InGaP. Ensuite, l'usage de la recette développée par Mathieu De Lafontaine permettrait la gravure de la totalité des matériaux III-V en environ 10 minutes. La chimie de cette recette est composée de Cl_2 , SiCl_4 et de H_2 . Les solutions de gravure humide présentées ici seront utilisées afin

d'attaquer spécifiquement une jonction ou l'autre dans le but d'identifier l'origine de défauts mesurables.

2.2) b) Techniques d'isolation électrique possibles

Comme nous l'avons mentionné précédemment il sera nécessaire d'isoler efficacement les flancs du via (23,33). Un flanc mal isolé permettrait l'échange de courant entre l'émetteur et la base court-circuitant ainsi la cellule. Plusieurs solutions d'isolation s'offrent à nous. Dans le cas de ce projet, nous avons décidé d'utiliser une résine de photolithographie. Ce paragraphe détaille les autres options et les raisons pour lesquels on les a rejeté.

La technique la plus simple serait de faire croître un oxyde thermique sur les flancs du via. Cette technique est investiguée par **Zhong et al.** dans leur article[37] sur des cellules silicium. Ils font la comparaison entre l'oxyde thermique et le dépôt PECVD. L'oxyde thermique se révèle plus performant et même idéal pour la situation (bonne conformité, pas de courant de fuite malgré une faible épaisseur). Cependant, dans notre cas cette approche poserait problème. Tout d'abord parce que l'oxyde de Germanium est soluble dans l'eau compliquant énormément la suite du procédé si l'on retient cette technique, car la plupart des nettoyages nécessitent des solutions aqueuses. Mais aussi parce que l'oxyde natif de GaAs favorise grandement la recombinaison des porteurs[27], phénomène que l'on cherche à éviter.

Le dépôt d'oxyde de silicium PECVD est traité dans plusieurs publications[34], [37], [38]. Une autre solution a été choisie pour ce projet, mais celle-ci reste à tester. Des développements seraient nécessaires et cet effort n'a pas été investi ici. Dans notre cas, l'ouverture apparente prévue pour le via rend cette option plausible (environ $400 \times 200 \mu\text{m}^2$ pour $180 \mu\text{m}$ de profondeur). L'isolation reste complexe à assurer dans un via aux flancs concaves comme les nôtres. Le flux d'atomes ne peut se déposer directement et il faudra que des atomes puissent entrer dans le via puis changer de direction avant de se déposer.

La technique de dépôt d'isolant la plus conforme reste incontestablement le dépôt par couche atomique (ALD ou PEALD si un plasma est utilisé). Cette technique consiste à déposer l'isolant couche atomique par couche atomique. **De Lafontaine et al.**[34] confirment que la technique est adaptée et fournit une très bonne isolation pour leurs vias (99,9% des vias isolés). Cependant, la technique est très couteuse et l'on aimerait si possible s'en passer ici. On a donc écarté cette solution mais elle reste pertinente.

On notera que notre cas est différent des vias traités dans la littérature du fait du profil évasé fourni par la gravure profonde isotrope de Ge. On peut donc envisager un étalement de résine dans le fond de notre tranchée. On en aura besoin quel que soit l'isolant utilisé, car, après dépôt de l'isolation, nous devons ouvrir une section au fond du via afin de parvenir à faire contact entre le métal déposé par la suite et la métallisation avant déjà présente. La Figure 2-3 illustre bien ce problème. On y voit un via large dont la morphologie est assez proche du notre. L'isolation est réalisée par le dépôt d'un diélectrique (en mauve). Cependant le contact avec la face avant nécessite l'ouverture locale de la couche isolante. Pour ce faire ils utilisent la lithographie avec une résine qui doit couvrir toute la surface de l'échantillon (en vert dans b)).

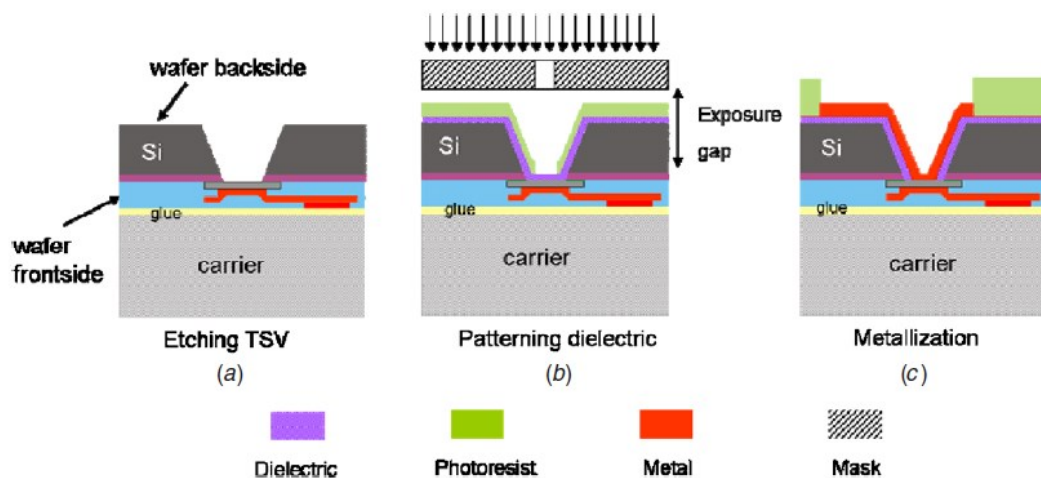


Figure 2-3 : Illustration des étapes nécessaires à la métallisation d'un via avec de la photo résine. Image tirée de [39]

Comme la lithographie semble incontournable pour ouvrir l'isolation au fond, cela nous ouvre la possibilité d'utiliser un étalement d'isolant photosensible. En effet, certaines résines sont destinées à rester sur l'échantillon de manière permanente et peuvent alors être utilisées pour leurs propriétés isolantes ou planarisante. Ces résines sont en général utilisées en micro-électronique pour séparer les contacts d'un dispositif[11] par exemple. Dans notre cas 3 familles de résines ont été envisagées. Les résines SU-8[40] qui sont à base d'époxy, permettent de former des structures de grandes dimensions qui ont une très bonne stabilité chimique et mécanique[41] et qui existent dans une grande variété de viscosités. Les résines HD-4100[42], à base de polyimide, semblaient aussi être une bonne solution, mais sont rarement utilisées pour des couches aussi épaisses. Finalement, les résines durimide[43] sont aussi des résines à base de polyimide conçues pour rester dans le dispositif. Les résines à base de polyimides présentent des performances attractives, mais subissent un retrait de 45% lors de leur réticulation ce qui causera des décollements à cause des trop grandes contraintes. Ces résines sont toutes des résines négatives.

Notons que la littérature[39] ne semble pas très optimiste quant à la conformité du dépôt par spin coating, notamment sur les coins supérieurs. Une alternative pourrait alors être le spray-coating[11], [39], [44], malheureusement cette technique ne peut pas être employée pour cette résine dans notre laboratoire. Elle consiste à déposer la résine sous forme d'un aérosol. Elle permet d'obtenir un dépôt continu dans des zones complexes à atteindre par spin-coating. L'uniformité du dépôt sur une surface plane laisse à désirer en comparaison du traditionnel spin-coating. Dans notre cas, la régularité du dépôt sur la surface supérieure plane du wafer ne nous intéresse pas on peut donc ignorer ce défaut du spray-coating.

Finalement, l'électrodépôt[39], [45] est une technique moins commune, mais qui pourrait s'avérer pertinente dans la couverture des flancs d'un via. Cette technique consiste à plonger l'échantillon dans une solution micellaire contenant le polymère à déposer. L'application d'un potentiel sur l'échantillon provoquera la migration des micelles vers la surface de l'échantillon où elles déposeront leur contenu. Cette technique est assez proche de l'électroplacage dont nous allons parler ultérieurement.

Les résultats présentés dans l'article de **Pham N.P. et al.**[39] sur l'isolation par électrodépôt sont cohérents avec nos objectifs. Cette technique semble donc être pertinente dans notre cas si l'on est capable d'obtenir un dépôt qui adhère sur chacune des couches de notre structure.

Finalement, quelle que soit la technique d'isolation choisie, la lithographie sera un défi. La photolithographie se fait habituellement en amenant le masque à utiliser au contact direct de la résine à insoler. Dans notre cas nous aurons au minimum $170\mu\text{m}$ d'écart entre le masque et le fond du motif à insoler. Avec un tel écart, on verra sans doute un impact sur la forme de la résine. **Pham N.P. et al.** ont étudié ce phénomène[39] et expliquent qu'au lieu d'un profil de résine bien droit, il sera évasé avec une grande dimension en haut pour une résine positive et en bas pour une résine négative. La Figure 2-4 illustre ce phénomène schématiquement, et la Figure 2-5 montre les observations au microscope électronique correspondantes. Ce phénomène mérite d'être quantifié sur les résines et le profil utilisé pour s'assurer qu'il ne pose pas de problème au cours de la métallisation.

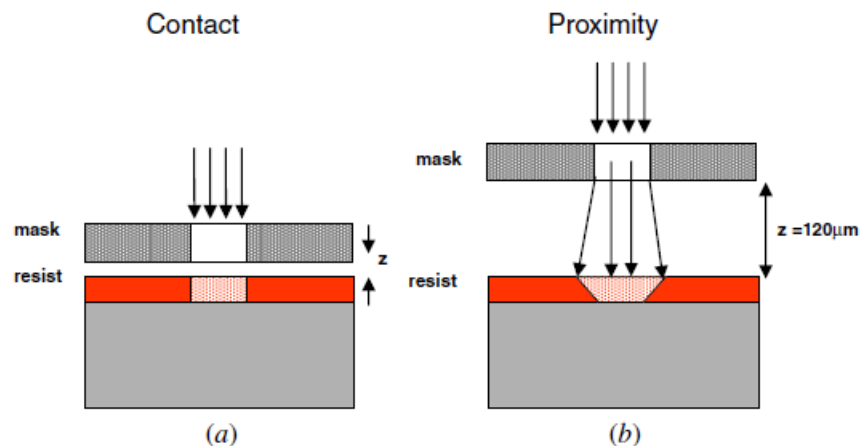


Figure 2-4 : Schéma des effets d'un écart entre le masque et la résine: (a) hard contact et (b) proximité avec gap de $120\mu\text{m}$ et résine positive. Image tirée de [39]

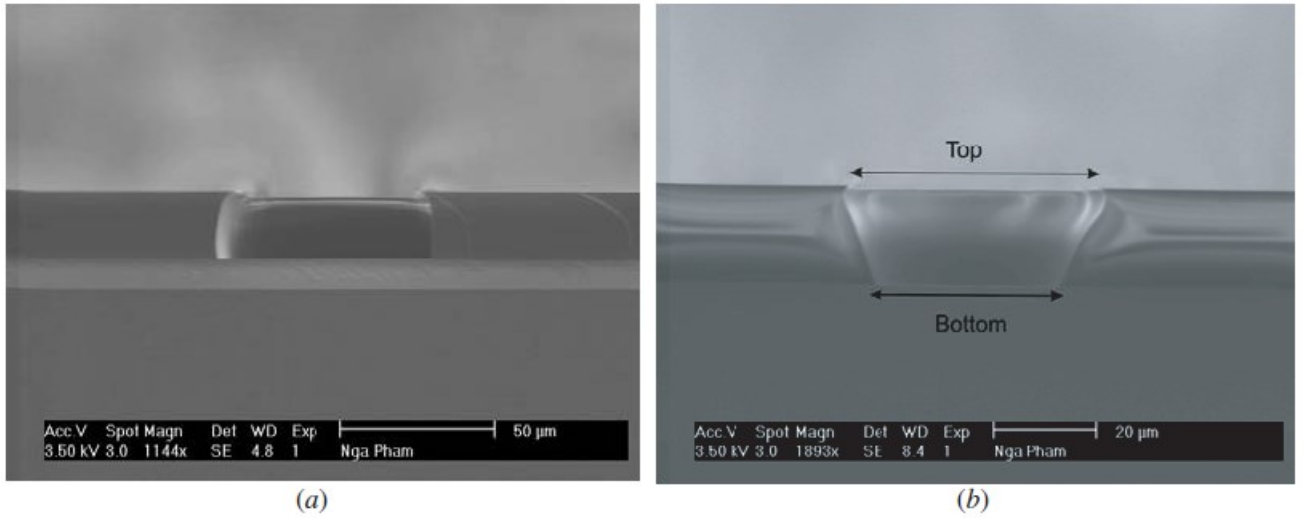


Figure 2-5 : Motifs dans une résine positive de 20µm d'épaisseur avec une exposition (a) hard contact et (b) proximité avec un gap de 120µm. Image tirée de [39]

L'isolation électrique des vias sera donc réalisée à l'aide d'une résine négative de type SU-8 et l'ouverture dans cette résine sera pratiquée par lithographie. La littérature met en garde contre plusieurs difficultés découlant de la topographie, l'épaisseur de résine et l'éventuel écart entre résine et masque. Ces difficultés et leurs solutions seront discutées en 4.4). Maintenant que nous avons une solution d'isolation, il convient de métalliser le via pour permettre le transfert des charges générées en face avant vers la future électrode en face arrière.

2.2) c) Métallisation des vias

Une fois les vias creusés, isolés avec une ouverture pour la connexion à la métallisation avant, il faudra métalliser les vias. L'objectif est d'abord d'obtenir une couche de métal continue entre l'avant et l'arrière du dispositif pour garantir le transport des charges. Par ailleurs, plus cette couche est épaisse, moins la résistance R sera importante, car la résistance d'un conducteur est donnée par

$$R = \frac{\rho * l}{S}$$

Avec ρ la résistivité du matériau en Ω , l la longueur du conducteur en m et S sa section en m^2 . De ce fait plus la section est grande (i.e. la couche déposée est épaisse)

plus l'on limite les pertes résistives. Dans cette section, 5 techniques de dépôt métalliques vont être discutées : l'évaporation, la pulvérisation cathodique, l'ALD, la sérigraphie et l'électroplacage. Ici encore nous présentons les techniques à notre disposition. La technique retenue a été la sérigraphie.

L'évaporation consiste à chauffer un creuset du métal à déposer à l'aide d'un faisceau d'électrons. Les molécules qui s'évaporent pourront alors se condenser sur le substrat[11] et former un film métallique. Le dépôt est donc assez directif et risque de ne pas remplir correctement des vias à fort rapport d'aspect. Cependant dans notre cas on pouvait envisager de s'en servir, car l'ouverture de notre via est grande. La pulvérisation cathodique présentera des résultats similaires, plus conformes, mais les films déposés sont souvent de moins bonne qualité[11]. Ces deux techniques ont été investiguées sans succès dans d'autres variations du procédé.

L'ALD dont nous avons discuté plus tôt pour l'isolation des vias ne semble pas pertinente ici. En effet, la technique est bien trop coûteuse par rapport à l'épaisseur à déposer.

L'électroplacage est la technique conventionnelle de métallisation de vias dans l'industrie micro-électronique[11], [38], [46], [47]. Typiquement du cuivre est utilisé pour les vias dans les substrats de silicium[38], [46]. L'électroplacage consiste à plonger l'échantillon à métalliser dans une solution contenant l'ion du métal à déposer. En appliquant un courant entre l'échantillon (électrode de travail) et une contre-électrode, on initie une réaction d'oxydo-réduction dont l'une des demi-équations mène à la neutralisation et au dépôt des ions métalliques sur les surfaces conductrices de la cathode qui est donc l'échantillon. L'autre demi-équation dépend de la nature de l'anode (contre-électrode soluble ou insoluble) et des espèces présentes en solution. Cette technique est particulièrement appréciée dans le cadre de la métallisation de vias car elle permet de remplir entièrement le via de métal avec un dépôt de qualité même à fort rapport d'aspect. La Figure 2-6 illustre cet avantage. Elle présente un via à fort rapport d'aspect en cours de placage (substrat Si). Chaque image illustre un temps plus avancé du placage. Finalement le via est entièrement rempli sans inclusion d'air.

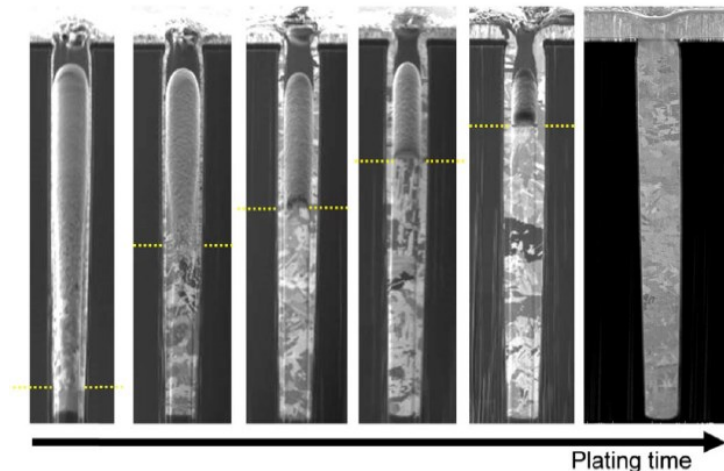


Figure 2-6 : Image MEB de l'évolution de la métallisation de vias en cuivre en fonction du temps d'electroplacage. Image tirée de [38]

Pour garantir un bon placage sur toute la surface, il est nécessaire de déposer une première couche de métal (couche d'accroche) qui permettra une bonne accroche de l'espèce à déposer et une répartition homogène du courant. C'est ce point particulier qui représente un défi dans notre cas.

Finalement, la sérigraphie[48]–[50] est une technique employée régulièrement dans l'industrie du photovoltaïque. Elle consiste à étaler une couche de pâte métallique sur la surface que l'on a préalablement couverte d'un pochoir. La pâte est poussée mécaniquement à travers les ouvertures et reproduit un négatif du pochoir utilisé. Il n'est pas évident d'affirmer que l'étalement de la pâte se passera bien jusqu'au fond du via. Cette pâte a par la suite besoin de subir un frittage à haute température (entre 400 et 930°C selon la pâte d'Ag sur le site de ESL electrosience[51] par exemple). L'avantage principal de cette technique est qu'elle est extrêmement simple technologiquement et déjà employée dans l'industrie photovoltaïque, car elle permet de former une métallisation à très bas coût.

Cependant notre isolant étant un polymère réticulé, il ne supportera pas un frittage haute température (max 250°C pour la SU-8). La pâte disponible en salle blanche n'est pas initialement destinée à la sérigraphie et n'a pas besoin de frittage, au

prix d'une plus haute résistance. Nous n'avons pas d'appareil destiné à faire une telle opération elle sera donc faite manuellement.

Parmi les 5 options de métallisation étudiées ici, c'est donc la sérigraphie qui a été retenue. Notons néanmoins que le placage reste très attrayant et pourrait être pertinent si de meilleurs résultats étaient obtenus dans le contrôle de l'arrêt de la gravure plasma.

2.2) d) Caractérisation des échantillons

Dans cette section nous allons discuter les techniques de caractérisation utilisées dans notre projet. Dans un premier court paragraphe, nous listerons les techniques de caractérisation utilisées en salle blanche au cours du procédé.

Au cours du procédé, il est nécessaire de contrôler à chaque étape le bon fonctionnement de l'étape précédente si possible. Il s'agit de détecter les défauts avant la fin du procédé où il sera bien plus complexe de détecter le défaut une fois couvert par d'autres couches ou affecté par des étapes subséquentes. Concrètement, entre chaque étape, une observation au microscope optique de la surface est incontournable. On cherche ainsi tous les signes de défauts apparents (bulle dans la résine, poussière sur l'échantillon, rayure...). On peut contrôler qu'une surface est conductrice ou isolante à l'aide d'une station sous pointe pour appliquer un voltage entre deux pointes. On peut contrôler la planéité d'une surface au microscope optique (mode nomarski ou dark field) ou mieux, à l'aide du profilomètre. Cet appareil passe une pointe sur la surface de l'échantillon et le déplacement vertical de la pointe permet d'obtenir un profil de la surface. Finalement on aura aussi recours au microscope électronique à balayage pour des détails très fins ou pour observer les échantillons en coupe afin de voir le contenu du via (technique destructive dans ce cas). Ceci résume la plupart des caractérisations faites régulièrement en salle blanche. Un fois nos dispositifs fabriqués il conviendra de les caractériser électriquement pour obtenir leurs performances avec et sans éclairage.

Nous allons donc ici détailler les techniques de mesure utilisées sur le dispositif final. Nous expliquerons d'abord quelles informations on cherche à extraire avant de décrire les montages utilisés. Comme nous l'avions mentionné au début du Chapitre 1: État de l'art, on cherche d'abord à obtenir une courbe I-V de la cellule avec et sans éclairage. Si la cellule est fonctionnelle et ne comporte pas de court-circuit, elle est comparable à 3 diodes montées en série (une diode par sous-cellule). En soumettant la cellule à une rampe de tension sous obscurité, on devrait obtenir une caractéristique I-V d'une diode dont la tension de seuil est égale à la somme des 3 tensions de seuil des jonctions. Cette courbe I-V sans éclairage est souvent appelé "courbe dark" de la cellule. Elle sert à contrôler si la cellule a un fonctionnement normal.

Une fois cette courbe obtenue, il convient d'obtenir la courbe sous éclairage. C'est la même courbe que précédemment à laquelle s'ajoute un courant photogénéré. C'est sur cette courbe que l'on se repose pour extraire les 3 paramètres généralement présentés pour décrire les performances d'une cellule. On présente généralement la courbe en convention générateur ce qui revient à inverser l'axe du courant. Ainsi on obtient la courbe de la Figure 2-7(a). Cette caractéristique contient de nombreux points d'intérêts annotés sur la courbe de droite. Le courant de court-circuit, J_{SC} , qui correspond au courant circulant dans la cellule sous éclairage quand aucune différence de potentiel n'est appliquée. La tension de circuit ouvert, ou V_{OC} , qui correspond à la tension apparaissant aux bornes de la cellule quand aucun courant n'y circule. Finalement le Fill Factor (FF) est moins visuel. Pour l'obtenir, on calcule d'abord la puissance débitée par la cellule dans le cas hypothétique où elle fonctionnerait à $V=V_{OC}$ et $J=J_{SC}$. Cette valeur correspond à la surface du grand rectangle de côtés J_{SC} et V_{OC} dessiné sur la Figure 2-7(b) en gris sombre. On cherche ensuite le point de puissance maximale réel. Pour ce faire, on trace la courbe $P=J*V$ en fonction de V et on trouve ainsi P_{max} le point de fonctionnement à puissance maximale de la cellule. De manière analogue à la puissance précédemment calculée, on peut la représenter sous la forme d'une aire (en gris clair sur la Figure 2-7). Le FF est donné par le rapport entre ces deux puissances.

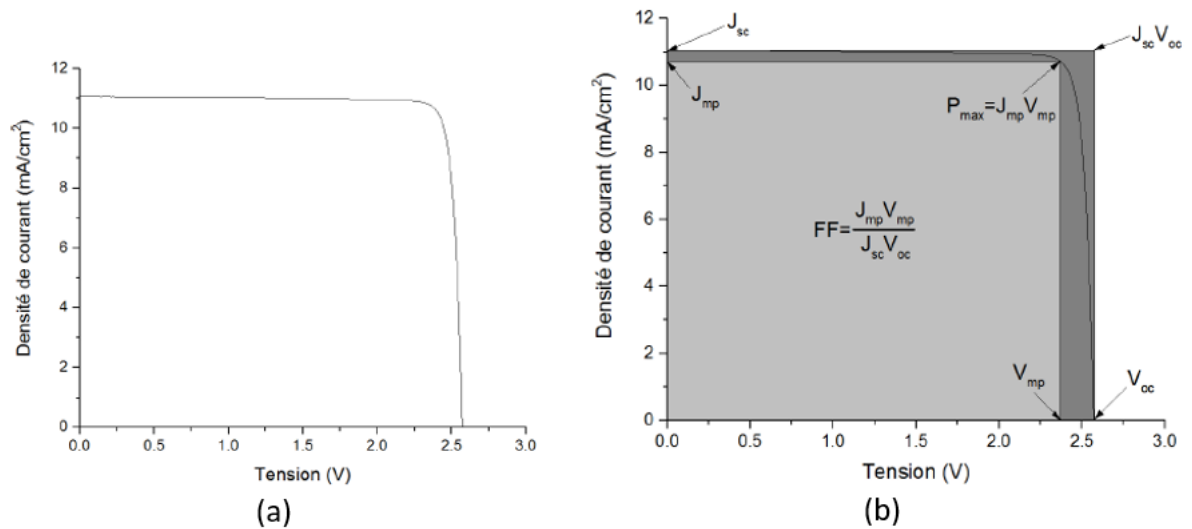


Figure 2-7 : Graphiques représentant une courbe I-V de cellule triple jonction standard. En (a) la courbe est tracée sans annotation et en (b) la même courbe est tracée avec tous les points d'intérêt annotés. Extrait de [26]

Une fois qu'on a extrait les caractéristiques de la cellule sous éclairage d'un soleil, on peut s'interroger sur ses caractéristiques sous concentration. C'est en effet de cette façon qu'on compte l'utiliser. On s'interroge ici sur l'impact de l'ajout du via. Sera-t-il source de pertes résistives trop importantes lorsqu'un grand courant passera dedans ? Est-il capable de soutenir les changements de températures provoqués par la concentration ? Il s'agit bien sûr aussi d'obtenir ses performances en concentration pour savoir comment elle se comporterait dans un vrai module. Finalement, on peut aussi s'intéresser à l'impact du via sur chacune des sous-cellules à l'aide d'une mesure d'efficacité quantique interne. À partir de l'ensemble des caractérisations citées dans cette section, on sera capable de comparer les cellules fabriquées à celles de la littérature.

Dans cette partie, nous avons identifié les étapes qui allaient représenter un défi de microfabrication. Nous avons ensuite exploré les solutions possibles pour les mener à bien avant de conclure sur la technique utilisée pour chacune. On ouvre le via à l'aide d'une gravure plasma, on l'isole grâce à une lithographie SU-8 et enfin on le métallise

par sérigraphie. Finalement nous avons succinctement expliqué comment nous comptons caractériser les cellules fabriquées.

Dans la partie suivante, nous allons expliquer la méthodologie suivie pour développer le procédé. Une fois le procédé proposé, il a fallu concevoir un jeu de masques de photolithographie qui devait permettre de mener les expériences nécessaires au développement du procédé, créer des cellules fonctionnelles et caractériser celles-ci ainsi que la fonctionnalité des différentes étapes. Nous discuterons donc aussi de la méthodologie suivie pour créer ces motifs.

CHAPITRE 3: MÉTHODOLOGIE ET CONCEPTION

Dans ce chapitre nous allons nous intéresser à la méthode suivie pour ce projet. Nous parlerons d'abord des stratégies mises en place pour développer le procédé avant de traiter de la conception des masques de photolithographie utilisés. Ces masques définissent les motifs obtenus sur l'échantillon et ont dû être conçus avant la fabrication des échantillons. Leur conception demande donc beaucoup d'anticipation car ils vont définir des limites qui ne pourront être levées par la suite.

3.1) Méthodologie suivie pour le développement du procédé

Le développement du procédé a été un processus long entre sa conception et son état actuel. Il représente la majorité du temps de travail consacré à ce projet. Nous allons ici courtement exposer la méthodologie suivie pour le concevoir, l'optimiser et identifier les problèmes de microfabrication.

Une première version théorique du procédé a été proposée à partir de la littérature scientifique. Comme on l'a vu précédemment, la littérature nous permet de mettre en place les grandes lignes d'un procédé en identifiant des étapes incontournables et des techniques de microfabrication avantageuses. Ce procédé théorique nécessite tout de même d'être affiné. Premièrement, on doit choisir les paramètres utilisés dans chaque étape. Par exemple, pour l'isolation du via, il faut choisir la résine, sa viscosité, la durée d'étalement, le temps d'étalement, le nombre d'étalements, le temps de recuit, etc. Les étapes devront donc être testées une à une pour trouver les paramètres qui conviennent à notre cas. Pour économiser du temps, on cherche d'abord à établir si certaines étapes sont identiques ou tout du moins semblables à des étapes connues et maîtrisées dans notre laboratoire. C'est dans ce souci que les étapes de fabrication de la face avant ont été reprises au procédé standard de fabrication, ou encore que la gravure des matériaux III-V se fait grâce à une recette déjà développée. Le plus gros des efforts de développement a donc été fourni sur les 3 étapes incontournables listées plus tôt (optimisation de la gravure et de son arrêt, isolation et métallisation du via). Dans un souci de segmenter le problème, on aborde

les étapes une à une. Une fois qu'un résultat satisfaisant est atteint pour une étape, on tente d'enchaîner sur la suivante.

Dans un premier temps c'est l'isolation diélectrique qui a été traitée. Dans un souci d'économie, les premiers tests ont été menés sur des échantillons de Si, car ce matériau est beaucoup moins coûteux que les wafers utilisés pour la fabrication finale des cellules. De plus, le Si et le Ge ont en général des comportements d'étalement semblables, ce qui nous permet de transférer facilement les résultats obtenus sur Si vers les substrats de Ge. Dans le cas de l'isolation diélectrique, des échantillons étaient préparés avec un masque prévu à cet effet présenté en Figure 3-1. Il porte de nombreux vias d'ouverture différente ($50 \times 50 \mu\text{m}^2$ à $400 \times 125 \mu\text{m}^2$) afin de déterminer la dimension donnant les meilleurs résultats. Chaque ligne oblique est un ensemble de vias dont le décalage permet de s'assurer d'obtenir une vue en coupe sur l'un des vias en faisant une clive de l'échantillon. Des vias étaient donc gravés au SF_6 avec ce masque (profondeur $180 \mu\text{m}$). On pouvait alors faire un étalement de résine isolante, effectuer la photolithographie, puis cliver pour estimer par la vue en coupe au MEB la qualité des étapes réalisées (l'étalement recouvre-t-il toute la surface à isoler, les motifs de lithographie sont-ils bien définis?). En suivant un processus itératif, on est parvenu à une solution satisfaisante sur Si, il a donc été temps de passer sur le véritable empilement de matériaux.

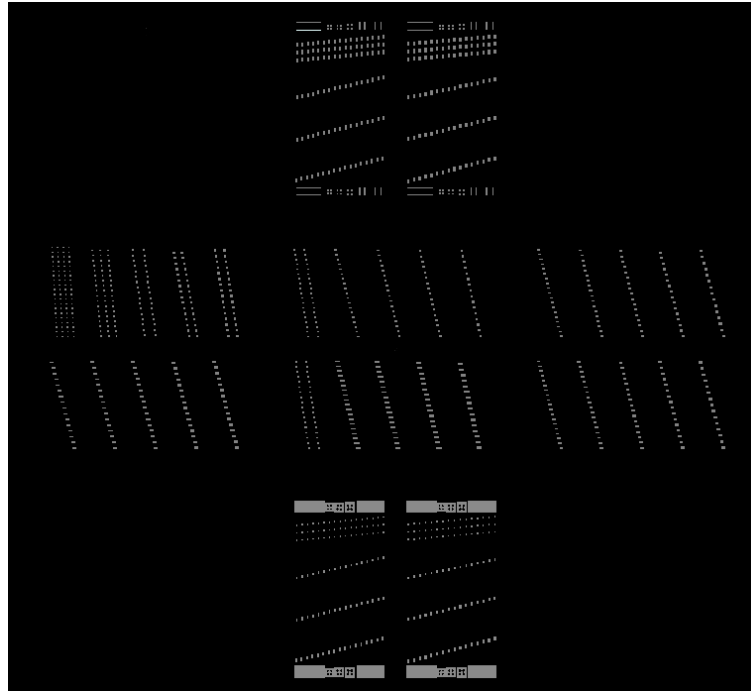


Figure 3-1 : Motifs présents sur le masque Guyane qui ont permis le développement de l'isolation par étalement de résine. Les 5 groupes de motifs permettent d'obtenir une grande variété de tranchées.

Un nouveau jeu de masques appelé "Hawaii" a été conçu à partir des résultats préliminaires d'étalements. La conception de ces masques sera traitée dans la section suivante. Ces nouveaux masques, la gravure a été testée et calibrée. Ces échantillons étaient alors utilisés pour confirmer le fonctionnement de l'étalement sur ces nouveaux matériaux et la nouvelle forme de via (qui varie entre Si et Ge+III-V). Lorsque ces deux étapes pouvaient être enchaînées, la métallisation du via a été développée. C'est donc ainsi, étape par étape, en réitérant les tests à partir des résultats obtenus au test précédent que le procédé a été ajusté pour valider le fonctionnement de chaque étape, identifier les interactions entre les étapes et contourner les problèmes posés par celles-ci.

Dans cette section, nous avons identifié la méthodologie suivie pour implémenter les tests qui ont permis d'ajuster tous les paramètres du procédé de fabrication. Nous traiterons dans la partie suivante de la nature exacte de ces tests ainsi que des problèmes rencontrés. Avant cela, dans la section suivante nous allons traiter du processus de conception du jeu de masque utilisé. On identifiera et on justifiera la

présence des différents motifs avant de lister les considérations qui ont gouverné les règles de dessin utilisées pour s'assurer de la compatibilité des différents niveaux de masquage.

3.2) Conception des masques utilisés

Dans cette section, nous allons présenter le jeu de masque "Hawaii" conçu pour ce projet. Le design de masques est une partie importante du développement du projet. Comme nous allons le voir, de nombreuses considérations entrent en jeu pour essayer d'anticiper tous les problèmes qui pourraient arriver. En effet, les masques sont dessinés à partir d'un procédé préliminaire. La conception d'un jeu de masque implique donc une réflexion importante sur toute interaction pouvant apparaître entre les différentes étapes. Les masques étant des pièces dispendieuses et longues à concevoir, on voudrait pouvoir s'en servir le plus longtemps possible. Ils doivent donc permettre de caractériser le plus d'éléments possible, et idéalement être utilisables de plusieurs façons différentes (échanger l'ordre de certaines étapes par exemple). Ce jeu de masques a tenu ses promesses, car il a permis l'implémentation et la modification de trois procédés différents dont le dernier en date est présenté dans ce travail. Notons par exemple qu'il était initialement dessiné pour un procédé commençant par la face arrière et que le procédé présenté dans ce rapport commence par la face avant, mais tolère quand même l'utilisation du même jeu de masque. Cette section sera séparée en deux sous-sections. Nous verrons d'abord comment les différents motifs ont été choisis puis nous aborderons les contraintes causées par les interactions entre les différentes étapes de procédé.

3.2) a) Description et justification des motifs

Le jeu de masque Hawaii est constitué de 7 niveaux différents (un détail de chaque niveau peut être trouvé en Annexe: A). Ces masques permettent de ont été conçus pour fabriquer des échantillons de 1.6*1.8cm².

La Figure 3-2 est une capture du niveau de métallisation avant (TM) qui permet de bien identifier les différents éléments du motif. Le masque est séparé en 5 sous-sections principales permettant une découpe facile des éléments (en cas de dicing):

- La cellule 1 cm en haut à gauche
- Les deux cellules 5 mm en haut à droite
- Les deux cellules 3 mm avec via accompagnés de la cellule de contrôle (3 mm) en bas à gauche (sans via)
- Les structures de tests électriques en bas à droite
- Les bords de l'échantillon qui portent des motifs divers soit les marques d'alignement, les vias d'alignement, les guides de découpe et les logos.

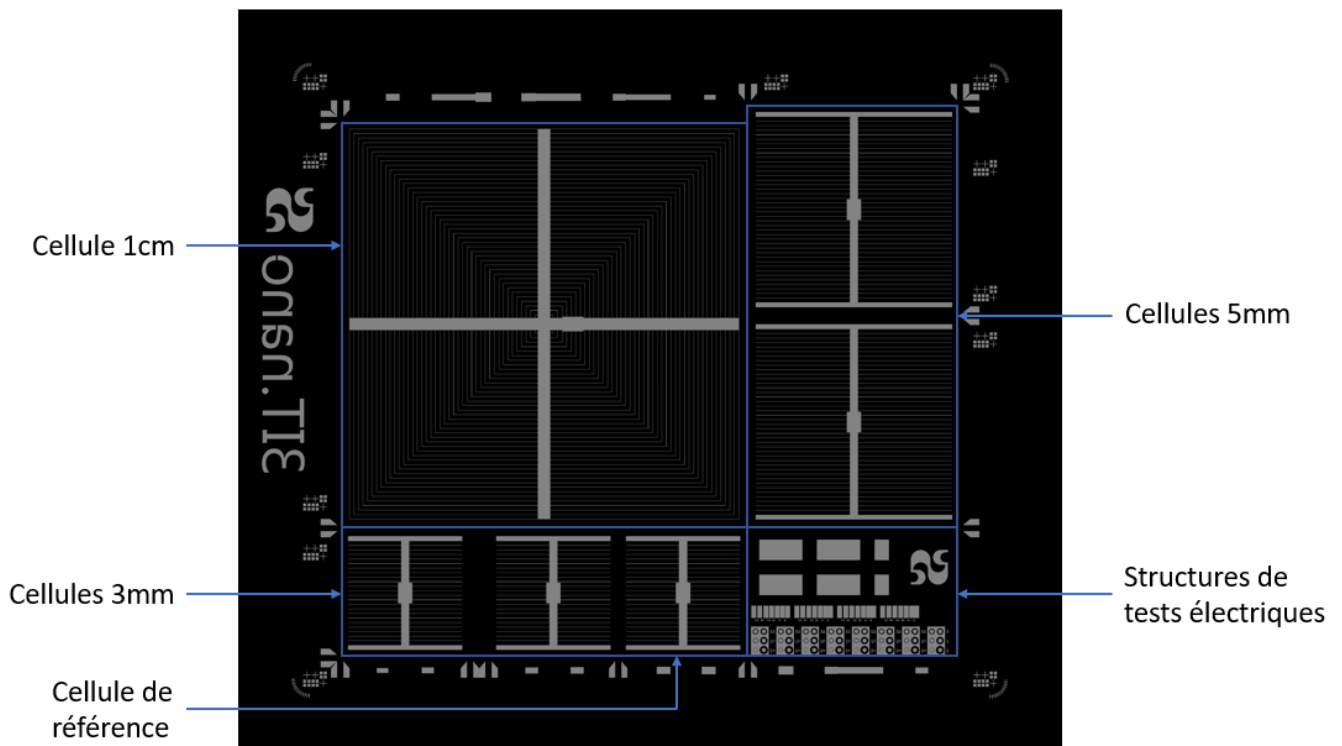


Figure 3-2 : Niveau TM du jeu de masque Hawaii. Les sections mentionnées sont encadrées en bleu. Les traits de découpe sont guidés par les encoches en forme de flèche grises.

Chaque échantillon permet donc de fabriquer 5 cellules à contacts face arrière. On a 1 cellule de 1cm de côté, 2 cellules de 5mm et deux autres de 3mm. Ces variations de taille sont pensées afin d'évaluer l'impact du via sur la résistance série de la cellule.

En effet, le courant généré par la cellule est proportionnel à la surface de celle-ci et chaque cellule ne porte qu'un via. Les pertes résistives du via seront donc proportionnelles à la surface de la cellule qui le porte.

Une sixième cellule (3 mm) a été ajoutée sur le design mais celle-ci ne comporte pas de via. Elle doit servir de référence pour savoir si le via change les performances des cellules. En effet, les performances des cellules sont dictées par de nombreux paramètres propres à l'échantillon tels que la qualité de l'épithaxie sur le wafer initial ou encore les manipulations subies par l'échantillon. On ne peut donc pas simplement prendre une cellule d'un autre lot et l'utiliser comme référence pour toutes les autres cellules fabriquées. Il s'agit donc d'avoir sur chaque échantillon une cellule qui aura suivi les mêmes étapes et qui servira de référence aux 5 autres cellules.

On note sur la Figure 3-2 que les cellules n'ont pas un design de métallisation avant standard (un bus bar de chaque côté relié par des grid lines). En effet, étant donné notre objectif de supprimer le besoin de contact avant, les bus bars n'ont plus nécessairement besoin de s'étendre jusqu'au bord. Les cellules n'étant pas connectées par wire-bonding, on n'a pas à s'inquiéter de l'ombrage causé par les wire-bonds. Dans notre cas elles s'étendent quand même jusqu'aux bords afin de permettre une éventuelle caractérisation par la face avant mais on préférera cependant les faire passer par le centre de l'échantillon. Ainsi le via pourra être proche du centre de la cellule afin de minimiser la distance moyenne parcourue par les charges dans la métallisation face avant qui sera probablement plus résistive que le via (épaisseur de métallisation 1.1 μm). Ici, les vias sont situés sous les bus bars là où ceux-ci s'élargissent. Cela nous permet aussi de réduire les risques de bris dus à la fragilisation induite par l'ajout du via. En effet, plus celui-ci est loin des bords de l'échantillon, plus l'on réduit la probabilité qu'une fracture soit initiée entre celui-ci et le bord.

Sur la Figure 3-2 on trouve aussi en bas à gauche des masques une section destinée à former des motifs de contrôle qui permettront d'évaluer la qualité de certaines étapes spécifiques. Plus concrètement, on y trouve des structures TLM sur la

face avant, des chaînes de vias et des capacités en face arrière pour évaluer la qualité de l'isolant SU-8.

Les TLM sont des structures standard qui vont permettre d'évaluer la qualité des contacts métalliques formés avec le semi-conducteur ainsi que la conductivité de la couche supérieure de l'épitaxie, la couche contact dans notre cas[52]. La Figure 3-3 montre les deux types de motifs TLM utilisés. Le principe d'un TLM est de faire une succession de mesures de résistance avec un espacement de plus en plus grand entre les contacts[53], [54]. En faisant ces mesures à 4 pointes pour s'affranchir de la résistance de contact entre pointe et métal on obtient une résistance R_{mes} donnée par:

$$R_{mes} = 2 * R_{contact} + \rho_{semi} * L$$

Avec L la distance entre les deux plaques métalliques de contact, $R_{contact}$ la résistance du contact entre le métal et la couche semi-conductrice et enfin ρ_{semi} la résistivité de cette couche (ici la couche contact). Ainsi on peut tracer à partir des points de mesure une droite affine d'ordonnée à l'origine égale à $2 * R_{contact}$ et dont la pente sera égale à ρ_{semi} . Le motif linéaire, en forme de plaque correspond au design standard souvent rencontré dans la littérature. Le design circulaire quant à lui permet d'effectuer la mesure avant même l'étape de gravure méso[53], [54].

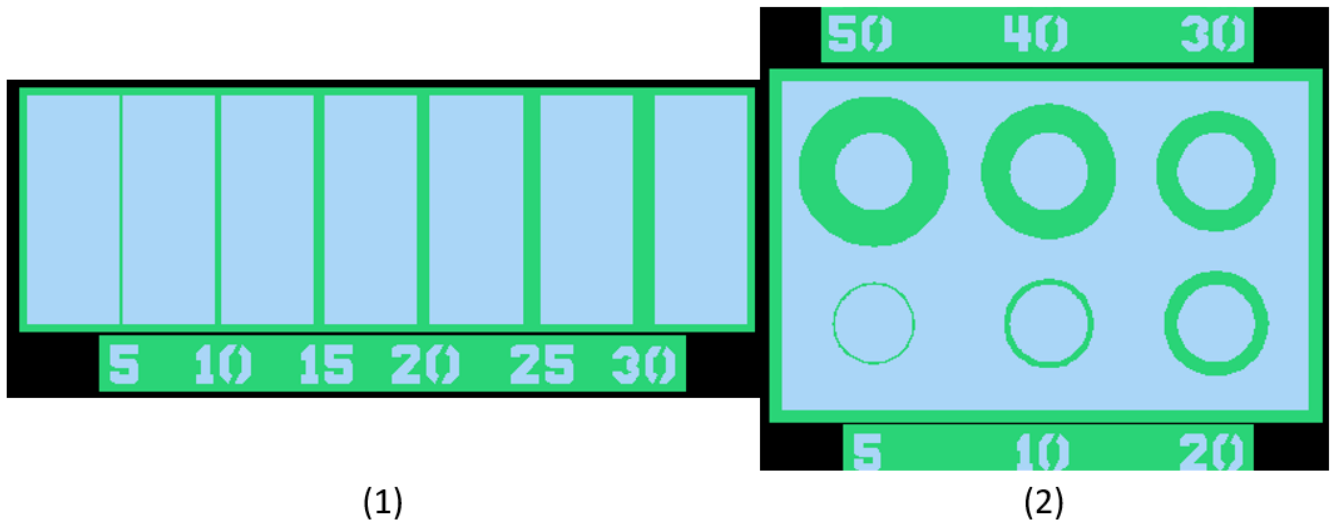


Figure 3-3 : Capture d'écran des motifs TLM utilisés. A gauche (1) on voit les TLM linéaire et à droite (2) les TLM circulaires. Le bleu indique la présence de métallisation avant et le vert correspond au niveau méso. Il indique que l'on se trouve dans une zone où les III-V sont conservés. Les chiffres indiquent la largeur de la bande de couche contact mesurée en micromètres.

Les capacités sont formées à l'aide de la métallisation de base, de la métallisation émettrice et de la SU-8 comme diélectrique. La Figure 3-4 est une capture d'écran de ces capacités. Le vert correspond au niveau de la SU-8 et donc au diélectrique des capacités. Les zones en noir ne portent pas de résine (métallisation de base) et les zones en bleues forment l'électrode supérieure de la capacité, déposée en même temps que le contact émetteur. On observe un total de 12 capacités de dimensions allant de 250 μ m à 1mm de côté. À partir des résultats électriques des capacités, on doit être capable d'évaluer la fiabilité de l'isolation SU-8. Le risque est avant tout l'éventuelle fuite de courant au travers de la SU-8 malgré le fait qu'on l'utilise comme isolant. On pourrait par exemple avoir de petits trous traversants (appelés pinholes) qui permettraient la formation d'un canal métallisé au travers de la SU-8. Comme discuté précédemment, de tels canaux compromettraient le fonctionnement des cellules. Si de tels canaux sont formés, on devrait en observer les effets grâce aux capacités. En effet, de si grandes structures devraient statistiquement porter ces défauts. S'ils sont présents, au lieu d'avoir une capacité idéale on aurait une fuite de courant, voire même un fil selon la sévérité du problème.

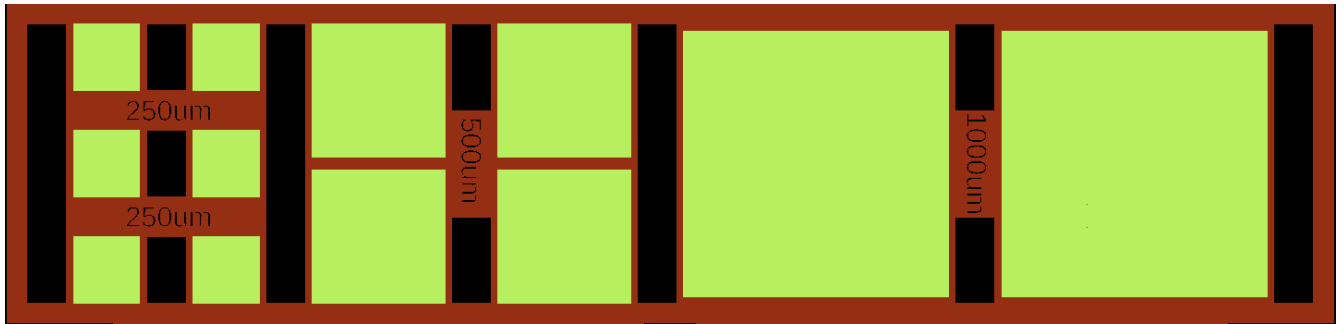


Figure 3-4 : Capture d'écran des capacités de contrôles. En noir on a les contacts sur la métallisation de base, en rouge le diélectrique et en vert la métallisation émetteur

Le chaînes de vias ont quant à elles pour fonction d'évaluer la résistivité des vias, ainsi que la fiabilité de ceux-ci. La caractérisation électrique d'un via unique n'est pas chose aisée, car il faut prendre contact de chaque côté de l'échantillon. Il convient donc d'assembler les vias sous forme d'une chaîne d'au moins 2 vias (ici on en a 10). La Figure 3-5 est un schéma en coupe d'une chaîne de via expliquant le chemin suivi par la métallisation pour permettre une continuité électrique. L'idée est de forcer le passage du courant à travers un nombre connu de vias. On peut ainsi déterminer la résistance d'un via unitaire en divisant la résistance mesurée par le nombre de vias mesurés.

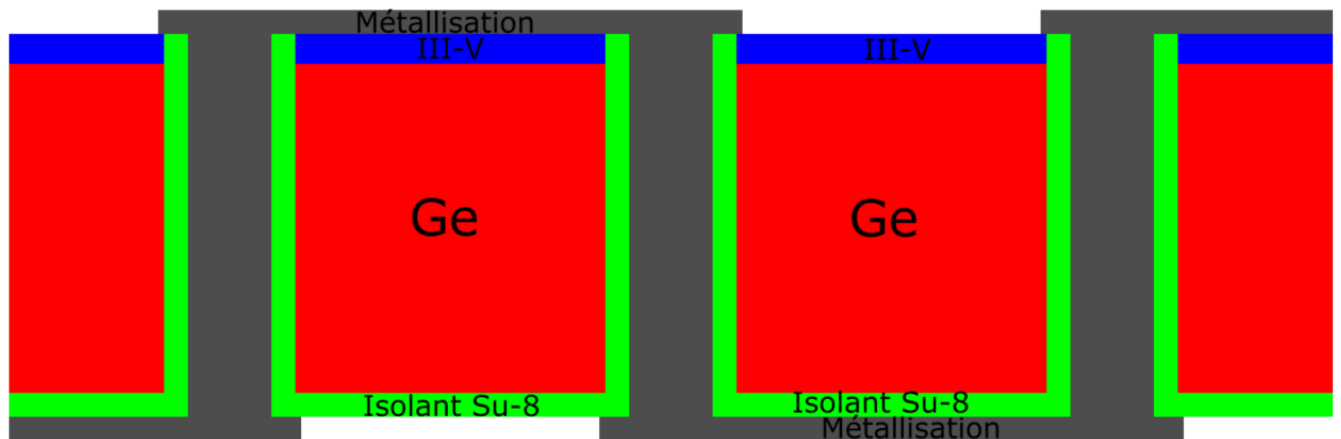


Figure 3-5 : Schéma en coupe d'une chaîne de 3 vias

Finalement, un autre enjeu dont nous avons peu parlé ici consiste à l'alignement entre la face avant et arrière. En effet, certaines machines permettent cet alignement comme l'aligneuse OAI806 présente au LNN. Les marques d'alignement utilisées,

présentées en Figure 3-6 ont été pensées pour permettre cette opération. L'image de gauche correspond aux marques de la face avant qui utilisent la métallisation comme référence (les niveaux successifs sont alignés sur celui-ci), l'image de droite présente les marques utilisées pour la face arrière. On constate que les mêmes structures ont été utilisées afin de permettre l'alignement des unes sur les autres. Malheureusement, cet alignement exige des marques d'alignement éloignées de 4.5cm au minimum. Faire des échantillons d'aussi grosses surfaces n'était pas envisageable en raison du coût du substrat. On n'a pas besoin d'une telle surface pour effectuer un test et une fois le test effectué, on ne va souvent plus utiliser l'échantillon. Pour régler cette contrainte, l'approche envisagée a été d'ajouter des vias sur le bord de l'échantillon et d'utiliser ceux-ci pour l'alignement entre les deux faces. En effet, le procédé initial prévoyait de commencer par la face arrière. Arrivé à la face avant on aurait été capables d'observer directement les vias traversants pour s'aligner. De nombreux vias ont donc été ajoutés dans les sections inutilisées du bord de l'échantillon. On verra plus tard qu'une autre solution a finalement été choisie pour le procédé final.

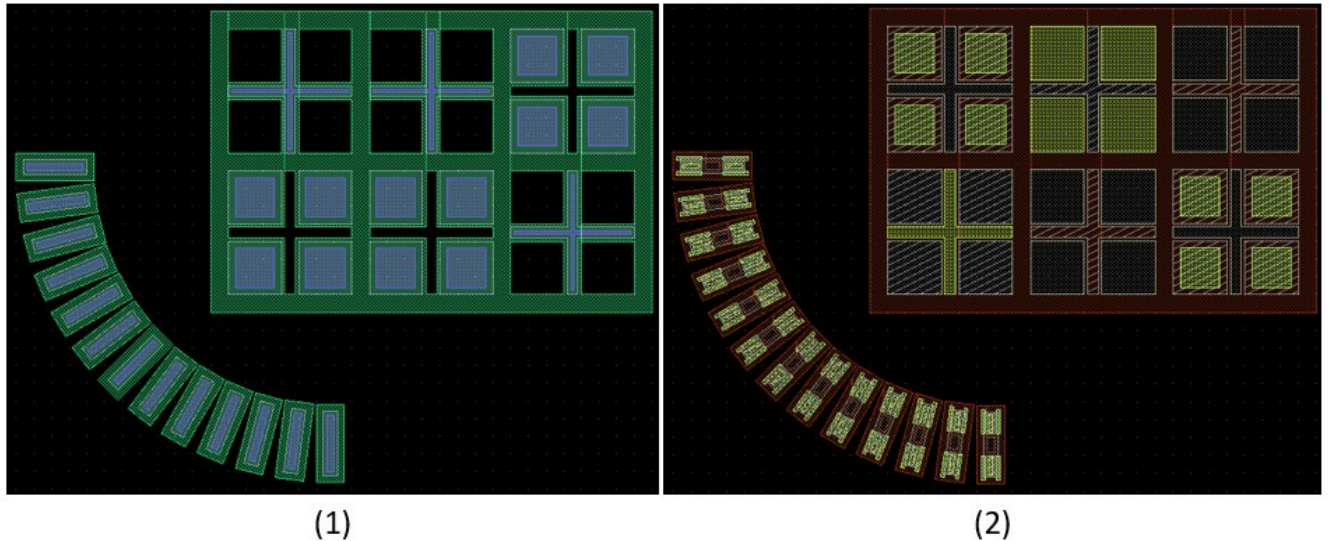


Figure 3-6 : Capture d'écran montrant le design des marques d'alignement

Maintenant que les différents motifs ont été présentés, nous allons rapidement expliciter les considérations qui ont fixé les règles de dessins.

3.2) b) Interaction entre les étapes

Certaines étapes sont susceptibles d'interférer entre-elles et il convient d'identifier ces interférences pour s'en prémunir dès le design des masques en établissant des règles de dessin.

Pour ce qui est de la face avant, c'est assez simple, car il n'y a que 3 niveaux donc uniquement 3 interactions possibles. Qui plus est, les étapes face avant sont standardisées et maîtrisées dans mon laboratoire. On ne veut pas exposer de métal (niveau TM) pendant la gravure plasma des mésas. Le niveau méso (MS) recouvre donc en tous points la métallisation avant avec une marge d'au moins $5\mu\text{m}$. Le niveau ouverture des contacts (OC) n'allait être utilisé qu'en cas de dépôt d'une couche anti-reflet (ARC) avec un besoin ultérieur de mesure en face avant. Dans ce cas, l'ARC serait ouvert par plasma ou gravure humide. À nouveau, on ne veut pas exposer des zones inutilement à la gravure risquant ainsi des contaminations de procédé ou la dégradation inutile d'un élément. Les ouvertures de contact sont donc entièrement incluses dans le métal ($5\mu\text{m}$ de sécurité minimum). On élimine par là même la troisième interaction (MS-OC). Notons que le niveau TM contient les guides de découpe. On cherche à ne pas toucher de métallisation avec la scie de découpe pour éviter une contamination de celle-ci qui pourrait entraîner le re-dépôt ultérieur de particules sur le flanc de jonctions provoquant un court-circuit. Les chemins de passage de la scie sont donc vides de tous motifs de face avant.

Pour ce qui est de la face arrière, les interactions considérées concernent les vias ou bien l'isolation mutuelle des électrodes. Le premier niveau utilisé, la métallisation de base (BM) comprend des zones de sécurité autour de chaque via, car on ne veut pas suspendre une membrane de métal lors du plasma SF_6 permettant la gravure du Ge. Le métal est par conséquent retiré de ces zones. Le métal est aussi retiré des zones où devra passer la scie en cas de découpe mécanique des échantillons. En effet, tant qu'à avoir des motifs dans la métallisation arrière ce ne serait qu'ajouter des risques que de ne pas exclure le métal de ces zones.

Pour le niveau d'ouverture des vias (VO), les deux seules contraintes ont été le choix de la dimension des vias ainsi que les marques d'alignement dédiées. En effet, la sous-gravure provoquée par le SF_6 est un problème au niveau des marques d'alignements. On ne peut se permettre d'avoir des trous dans celle-ci si on veut garder une bonne précision pour les couches suivantes. Le niveau VO bénéficie donc de marques d'alignement dédiées qui s'alignent sur des marques prévues à cet effet dans le niveau BM. Ces marques sont de très petites dimensions pour ne pas provoquer l'apparition de gros trous ($6\mu\text{m}$ dans le niveau VO). En gardant une petite ouverture, on ralentit considérablement la vitesse de gravure des marques par rapport aux vias de bien plus grandes dimensions. À partir du même raisonnement, si l'on veut que tous les vias se gravent à la même vitesse, une dimension standard pour tous les vias doit être fixée. Quelle que soit la taille de la cellule, des ouvertures rectangulaires de $300 \times 140 \mu\text{m}^2$ ont été choisies. Il s'agit de s'assurer que tous seront ouverts convenablement (jusqu'à la couche de nucléation) et que les ouvertures soient égales pour se comporter identiquement lors de l'étalement SU-8 qui est très sensible à la dimension des vias comme on le verra plus tard. Cette taille résulte des tests d'étalement préliminaires sur Si traités dans la section précédente.

Le niveau d'isolation diélectrique (DI) qui sert à l'étalement SU-8 ne comporte pas de contraintes majeures en soi. Les ouvertures sont assez grosses pour que l'on n'ait pas à s'inquiéter de la visibilité même s'il s'agit du seul masque en champ sombre. Les niveaux de métallisation arrière de l'émetteur (BEM) quant à lui a un lien très strict avec le niveau DI. Il faut impérativement que le métal soit intégralement déposé sur la SU-8. Si à un endroit donné les deux niveaux sont absents, la métallisation par placage aurait pu croître à cet endroit. On a donc une inclusion absolue de toutes les zones du motif BEM à l'intérieur des zones portant la SU-8 à l'exception des vias où le dépôt est voulu.

Deux niveaux de masquage ont été ajoutés par la suite. Un premier pour permettre l'ouverture des contacts de base suite à l'ajout dans le procédé d'un oxyde couvrant la base. Il s'agit simplement d'ouvertures rectangulaires loin de la métallisation émetteur afin de parer les éventuelles bavures de la sérigraphie manuelle.

L'autre niveau a été ajouté pour découper le masque kapton de la sérigraphie. C'est une copie du niveau BEM dans lequel les marges de sécurité relative au chevauchement SU-8 ont été grandement augmentées pour compenser l'infiltration de la pâte sous le masque. En effet, le masque n'étant pas fixe sur l'échantillon, la pâte a tendance à s'insinuer entre le masque et l'échantillon faisant perdre beaucoup de contrôle sur les dimensions. De grandes marges ont été ajoutées pour compenser. On peut retrouver une capture d'écran de ces deux masques en annexe A.

Dans cette section, nous avons donc vu les éléments constitutifs des masques Hawaï conçus pour les échantillons de ce projet. L'intérêt de ces motifs a été discuté pour éclairer le lecteur sur les considérations qui ont permis leur design. Les règles de dessin issues des interactions entre les différentes étapes du procédé ont aussi été exposées et justifiées.

Maintenant que la méthodologie adoptée pour le développement du procédé a été abordée, et que le lecteur visualise le design des échantillons et comprend les enjeux auxquels il répond, le procédé final va être exposé. Il s'agit du premier des deux résultats attendus de ce projet. On voulait obtenir un procédé détaillé ainsi que des cellules fonctionnelles caractérisées électriquement. Nous allons donc l'étudier et exposer les difficultés rencontrées et les tests réalisés qui justifient les étapes et paramètres retenus.

CHAPITRE 4: DESCRIPTION ET JUSTIFICATION DU PROCÉDÉ RETENU

Nous allons ici étudier le procédé retenu à travers l'analyse de ses étapes principales et des paramètres utilisés pour celles-ci. On ignorera donc par exemple l'ensemble des étapes de nettoyage ou les détails de la plupart des étalements et des photolithographies. Pour une version parfaitement détaillée du procédé on peut se référer à l'Annexe 1). Les étapes et paramètres retenus ici seront expliqués et justifiés à la lumière des tests réalisés pendant le développement du procédé. Les enjeux auxquels répond chaque étape seront explicités.

On ne présente ici que le procédé retenu, baptisé Front Face First (FFF). Deux autres versions du procédé ont longtemps été envisagées. La plupart des résultats de tests présentés dans cette partie seront donc souvent des images correspondant à ces deux procédés alternatifs. La principale différence est contenue dans le nom FFF. Les deux autres procédés consistaient à commencer par la fabrication de la face arrière. Ils n'ont pas pu être menés à bien faute d'arriver à gérer l'arrêt précis de la gravure du via pour l'un, et à cause de difficultés de métallisation du via pour l'autre. La principale différence entre les trois versions du procédé est donc avant tout l'ordre dans lequel les étapes sont réalisées.

Cette partie sera séparée en 5 sous-sections représentant des blocs technologiques qui correspondent à un enjeu ou une difficulté précise. On parlera des étapes face avant, des étapes permettant le transfert en face arrière, de la gravure du via, de son isolation et finalement de sa métallisation.

4.1) Étapes face avant

Nous allons traiter ici des étapes utilisées pour fabriquer la face avant des cellules; ce sont toutes des étapes connues, nous allons donc les présenter rapidement, mais peu ou aucuns tests n'ont été nécessaires pour les développer dans ce projet.

On commence le procédé avec un échantillon tiré d'un wafer de Ge portant déjà les couches de matériaux III-V épitaxiés à sa surface. Sur la face arrière, une couche de 50 nm Si_3N_4 est présente. Celle-ci permet d'optimiser les contraintes lors de l'épitaxie et n'est plus nécessaire ici. La première étape est donc de la graver, à l'aide d'acide fluorhydrique (HF) à 49% de concentration. La gravure prend un peu plus de 1min40s. La fin de gravure se détecte visuellement lorsque les couleurs ne changent plus et que la face arrière est de la couleur gris-blanc caractéristique du Ge. On ajoute généralement 10s de sur-gravure, car la surface dépolie de la face arrière peut prêter à confusion. Le substrat est donc maintenant prêt à être utilisé. La Figure 4-1 représente ce substrat initial. En rouge on voit le substrat de Ge et en bleu les matériaux III-V. Ces schémas seront utilisés tout au long de cette partie pour illustrer l'état de l'échantillon après l'étape. Ils seront à chaque fois accompagnés d'une vue isométrique de la cellule à gauche (a) et une vue en coupe à leur droite (b). Ce plan de coupe perpendiculaire à la surface supérieure passe par le milieu de la cellule. Ce plan de coupe est représenté en pointillé sur la Figure 4-1 (a). Il sera toujours le même.

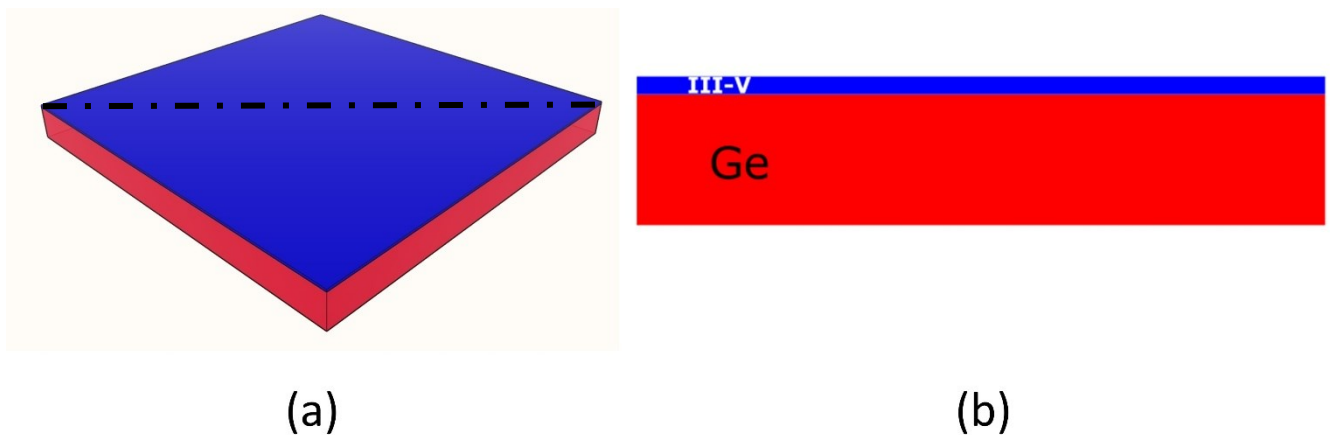


Figure 4-1 : Schémas du substrat initial. (a) vue isométrique d'une cellule par la face avant. (b) Vue en coupe (coupe au centre de l'échantillon)

On commence donc par le dépôt d'une métallisation épaisse en face avant. Cela consiste à déposer les bus-bar et les grid-line qui vont permettre de canaliser les charges générées par l'émetteur vers le via situé sous le bus-bar. L'épaisseur importante du métal 2 fonctions ici : réduire les pertes résistives dans les grid-lines et conférer une résistance mécanique à la membrane qui sera révélée en fin de gravure du via. On

procède par soulèvement pour appliquer le motif et la métallisation consiste en 4 couches de métaux successives (Ni50nm/Ge20nm/Ni30nm/Au1 μ m). Dans cet empilement, les 3 premières couches permettent de former un contact ohmique sur la "couche contact" sur laquelle elles sont déposées. L'or joue le rôle de métal épais et bon conducteur. Plusieurs métaux moins coûteux (Ag, Al ...) auraient pu être employés, mais la gravure du via qui doit s'arrêter sur ce métal exclut l'usage d'argent (interdit dans la machine de gravure plasma) ainsi que d'aluminium (qui subit des dégâts importants au contact du Cl de la gravure plasma). Nous serons amenés à discuter en détail cet enjeu dans la section sur la métallisation. L'or, souvent utilisé pour cette couche est donc bien adapté ici, quoique très coûteux. L'échantillon a maintenant l'aspect présenté sur la Figure 4-2.

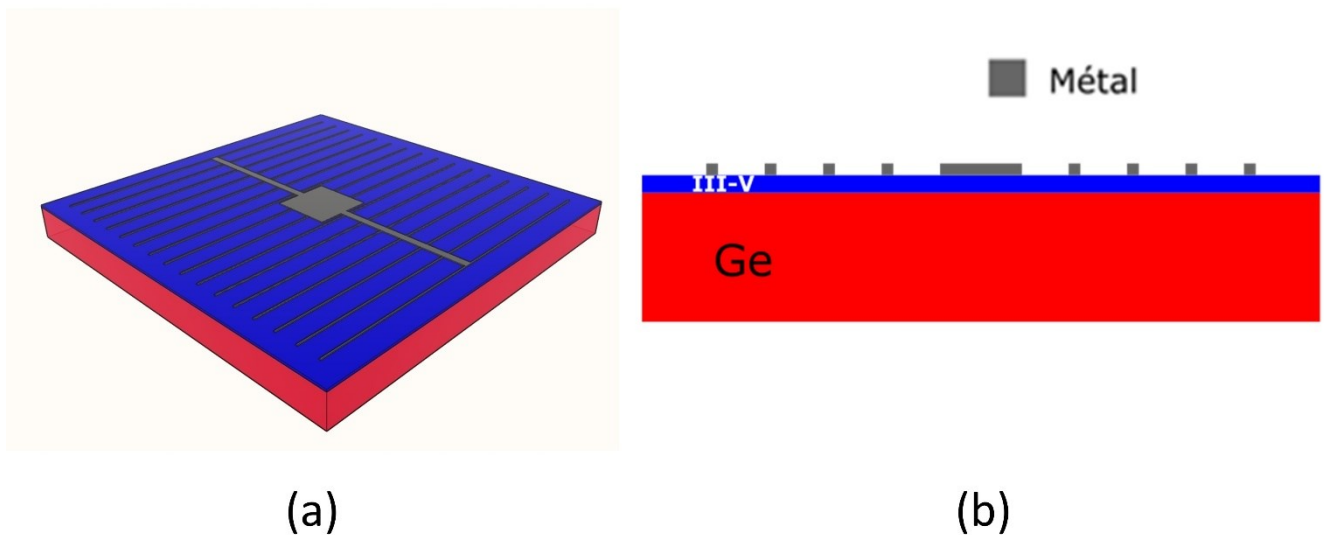


Figure 4-2 : Schéma d'une cellule métallisée. (a) vue isométrique d'une cellule par la face avant. (b) Vue en coupe (coupe au centre de l'échantillon)

Il s'agit maintenant d'isoler les cellules les unes des autres. En effet, on veut pouvoir mesurer les cellules une à une sans influence des matériaux adjacents. Pour ce faire on doit se débarrasser des couches actives en dehors des cellules. C'est le rôle de la gravure méso. On procède par gravure plasma. La recette utilisée est la même que celle qui sera utilisée pour les matériaux III-V lors de la gravure du via (chimie chlorée: $\text{SiCl}_4/\text{Cl}_2/\text{H}_2$). La Figure 4-3 donne les paramètres utilisés. Ici, on grave pendant 13 min pour supprimer entièrement les 8,6 μm de III-V et graver un peu de Ge (environ 4 min

de sur-gravure). Une fois cette gravure effectuée, on obtient un échantillon tel que présenté dans la Figure 4-4.

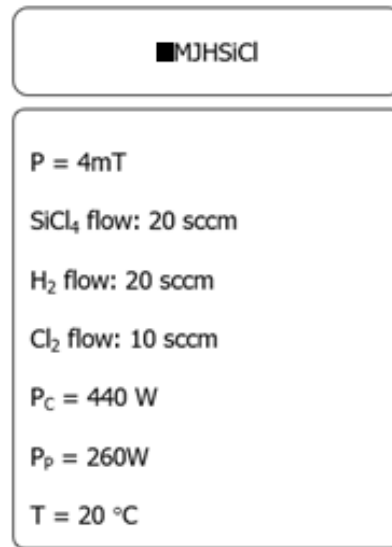


Figure 4-3 : Paramètres de la recette MJHSiCl qui permet la gravure plasma des matériaux III-V

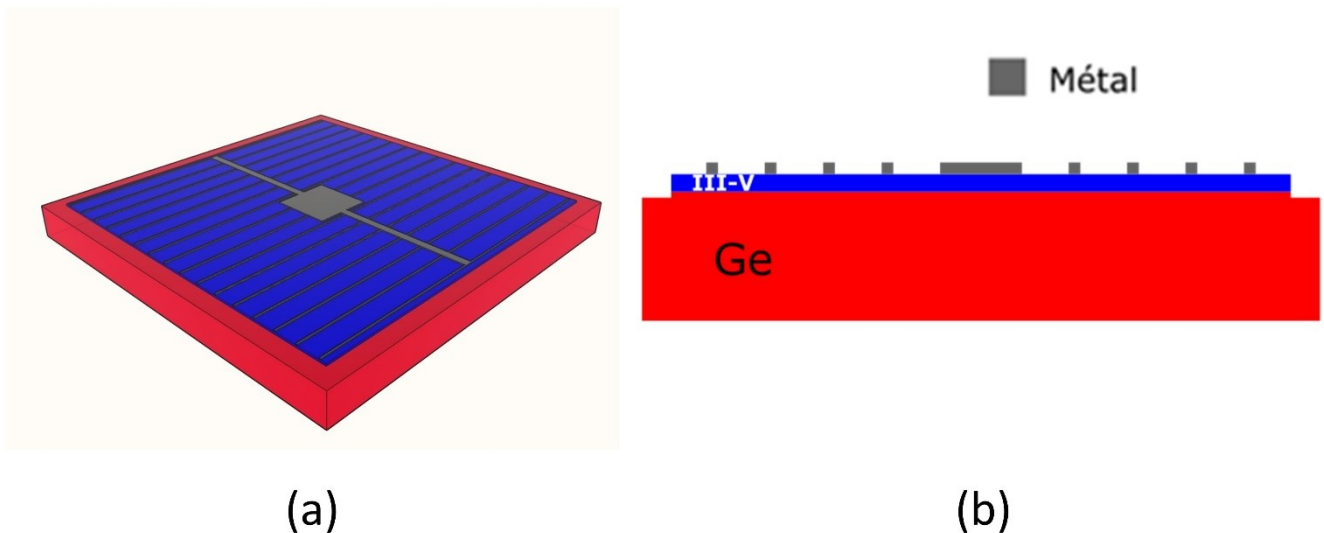


Figure 4-4: Schéma d'une cellule après gravure méso. (a) vue isométrique d'une cellule par la face avant. (b) Vue en coupe (coupe au centre de l'échantillon)

Dans un procédé habituel, c'est maintenant, après le dépôt de la métallisation avant et la gravure méso, que l'on graverait la couche contact. Il s'agit de la couche supérieure des matériaux épitaxiés. Son rôle est de garantir un bon contact du métal sur les semi-conducteurs. En revanche elle absorbe des photons qu'on veut récupérer dans

les jonctions actives. Il s'agit donc de la retirer là où le métal est absent et que la lumière peut rentrer. La gravure utilise la métallisation elle-même comme masque dur, on parle donc de gravure auto-alignée. Dans notre cas, on voudrait déposer le contact de base (face arrière) avant d'effectuer cette gravure. Ainsi la face avant reste protégée par la couche contact pendant ces manipulations. Par ailleurs cette gravure aide à la passivation des surfaces et on voudrait donc que ce soit le dernier bain en contact avec la face avant. Nous allons donc voir comment on aligne les motifs entre les deux faces de l'échantillon puis la technique retenue pour protéger la face avant jusqu'à la fin du procédé.

4.2) Transfert vers la face arrière

Pour aligner les motifs entre les deux faces de l'échantillon, comme nous l'avons discuté plus tôt (3.2) a)), on ne peut utiliser l'aligneuse du fait de la trop petite taille des échantillons. La solution retenue est de sacrifier certaines marques d'alignement pour les graver au travers du substrat à l'aide d'un laser. Les trous ainsi formés seront les formes sur lesquelles on pourra aligner les motifs de la face arrière. Comme discuté dans la partie sur les masques, les marques d'alignement sont dessinées pour pouvoir être alignées entre les deux faces La Figure 4-5 montre une vue au microscope optique des trous obtenus sur un échantillon. En (a) on voit les trous par la face avant (III-V) et en (b) les trous de sortie du laser par la face arrière (Ge). Les contours ne sont pas aussi précis qu'une lithographie et on ne peut attendre une grande précision. Par ailleurs l'alignement du laser est déjà complexe à cette échelle.

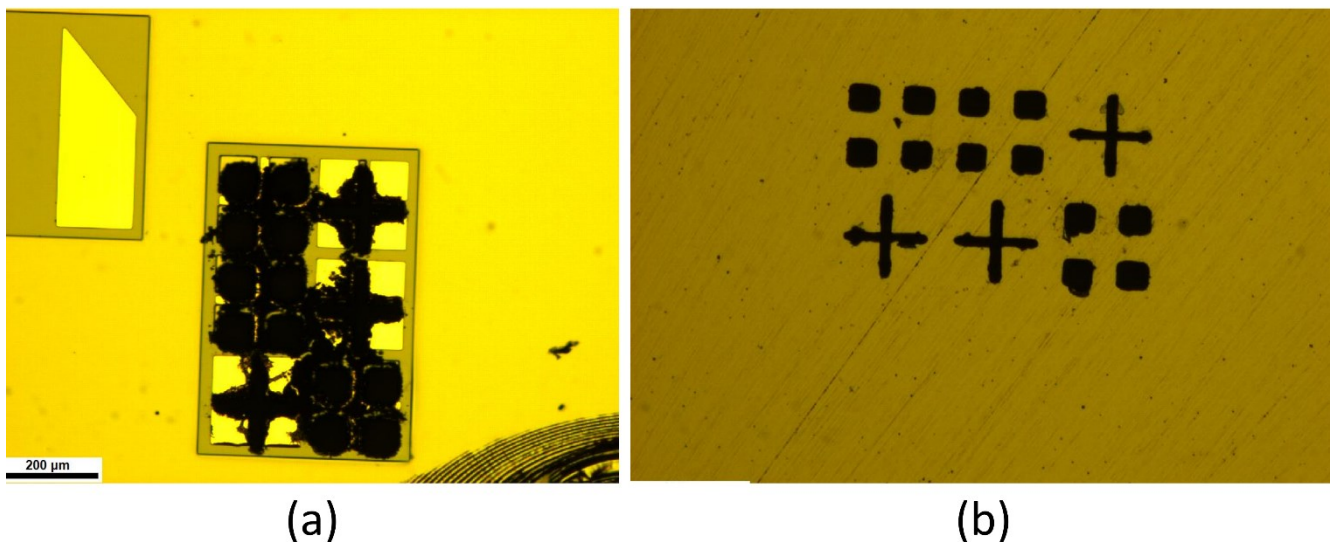


Figure 4-5 : Image au microscope optique des perforations laser. (a) vue par la face avant on distingue les restes de la marque d'alignement sacrifiée. (b) vue par la face arrière

Heureusement, on avait prévu que l'alignement entre les deux faces serait difficile. De larges zones de sécurités ont été prévues et les vias sont inclus dans ces zones comme on peut le voir sur la Figure 4-6. On y voit que le via ne dépasse pas hors de la métallisation. La précision de l'alignement varie selon les vias et les échantillons. La distance restante entre le via et le bord de la métallisation est toujours comprise entre 12 et 30 μm.

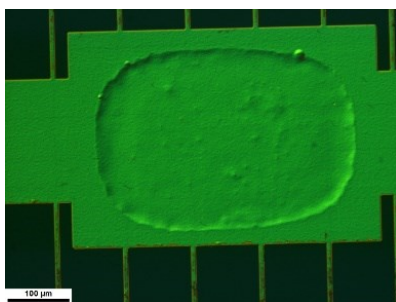


Figure 4-6 : Vue au microscope optique en mode Nomarski de la déformation de la métallisation provoquée par le via. On constate que le via est dans les marges de tolérance prévue. On constate aussi une déformation de la métallisation qui ne pose à priori pas problème

On peut alors métalliser la face arrière par évaporation de Nickel (150nm) par évaporation. Les motifs sont obtenus par soulèvement aligné sur les marques perforées par laser. Pendant cette lithographie, la face avant est protégée à l'aide d'une résine pour éviter tous dommages mécaniques qui pourraient être infligés à cette face quasi-

terminée. La Figure 4-7 illustre l'échantillon après cette étape. Cette fois, la vue isométrique présente la face arrière du dispositif.

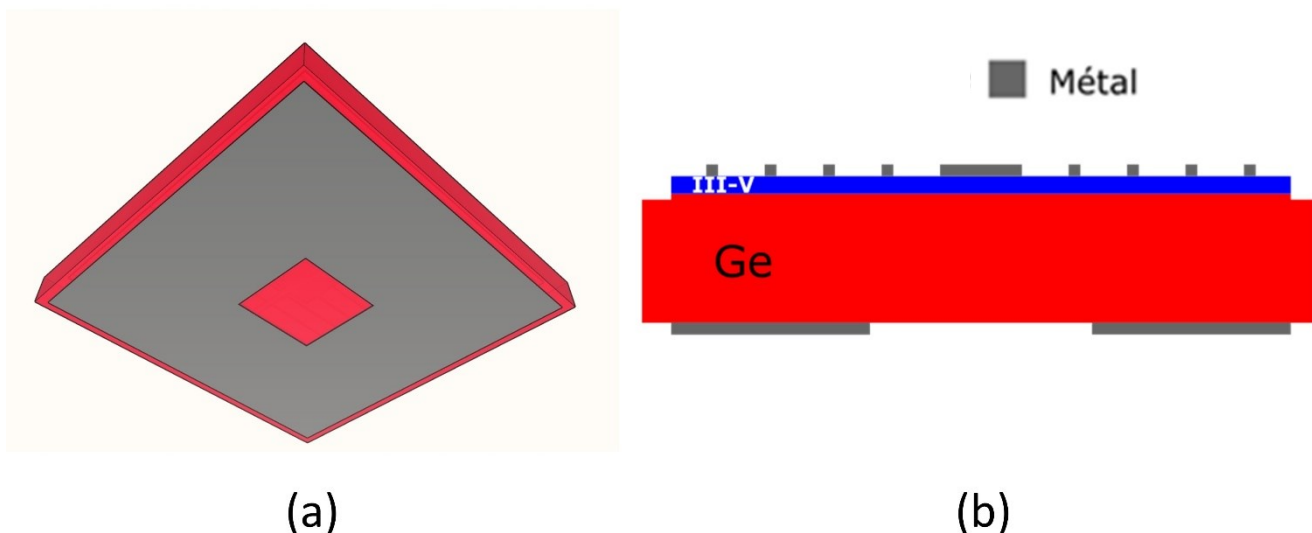


Figure 4-7 : Schémas d'une cellule venant de recevoir sa métallisation de base. (a) Vue isométrique d'une cellule par la face arrière. (b) Vue en coupe (coupe au centre de l'échantillon)

C'est maintenant que l'on va utiliser les structures TLM évoquées dans la 3.2) a). On doit obtenir la valeur de résistance de contact ainsi que la résistivité de la couche contact avant la gravure de celle-ci. La résistance de contact nous renseigne sur la qualité de nos métallisations.

On grave alors la couche contact et l'on peut mesurer chacune des cellules de l'échantillon dans l'obscurité et sous éclairage. Ces mesures serviront de référence à atteindre. En effet, à ce point du procédé, elles n'ont subi que des étapes standard qu'une cellule "classique" aurait subies. Ainsi on peut déterminer l'écart entre cette mesure et la mesure finale avec le renvoi de contact effectué. On obtient ainsi une estimation de l'impact des étapes supplémentaires sur les performances de cellules.

Une fois ces mesures prises, la face arrière est couverte d'un oxyde protecteur par pulvérisation cathodique de SiO_2 ($1\ \mu\text{m}$). Cette couche sera utile plus tard pour la gravure des III-V en fond de via. Toutefois, il est préférable de la déposer dès maintenant. Si l'on attend le collage de l'étape suivante, le dépôt se fera sur le PDMS

qui borde l'échantillon. L'oxyde déposé sur une surface souple comme le PDMS aura tendance à se fracturer et s'écailler ce qui peut poser des problèmes de particules.

La face avant complètement terminée est actuellement vulnérable à tout dommage mécanique ou chimique pendant les étapes portant sur la face arrière. Dans le but de protéger celle-ci, on utilise du PDMS pour coller de manière permanente une lamelle de Quartz ($\sim 500\mu\text{m}$) par-dessus notre échantillon. Ce procédé de collage développé dans notre laboratoire utilise des matériaux (quartz et PDMS) qui sont transparents sur le spectre solaire considéré. L'impact de ce collage sur les performances de la cellule peut ainsi être minimisé (impact estimé à 4,8% du J_{SC} [55]). La Figure 4-8 illustre l'état actuel de la face avant de l'échantillon qui est maintenant achevée.

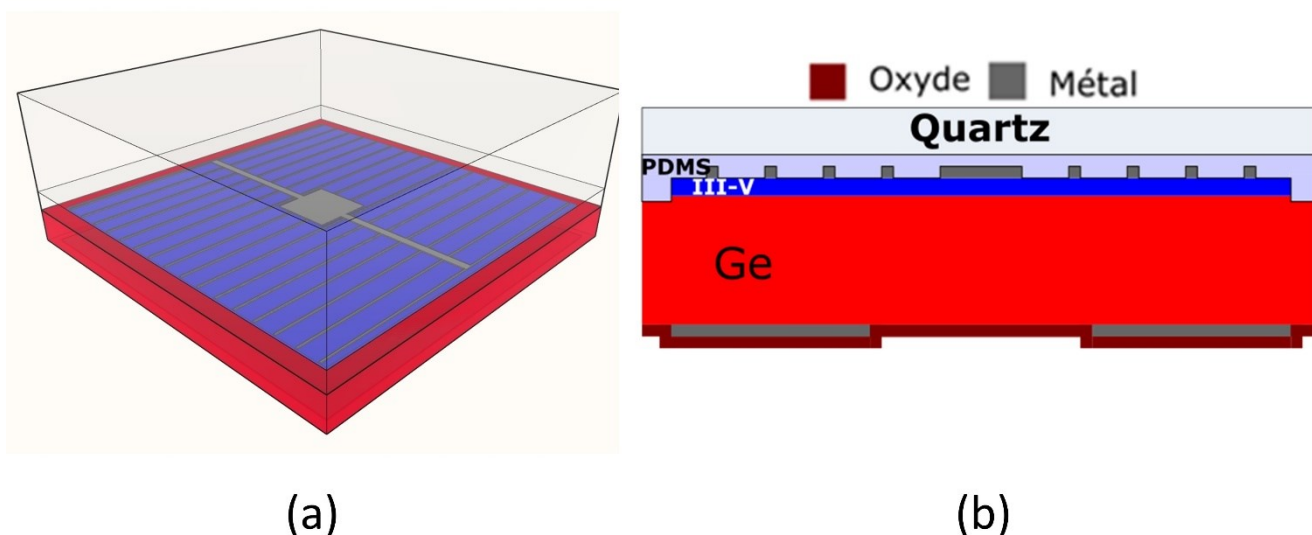
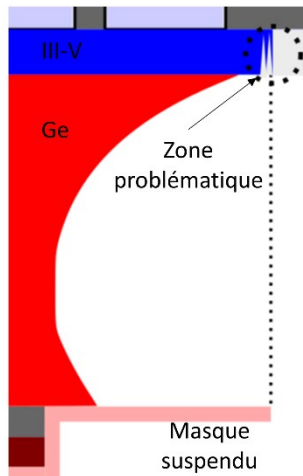


Figure 4-8 : Schémas de la cellule avec la face avant terminée.

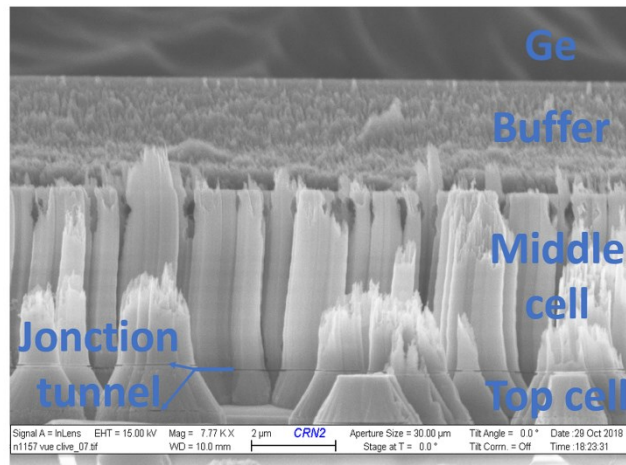
Maintenant que l'alignement entre les deux faces est effectué, que toutes les mesures nécessaires ont été prises et que la face avant est protégée des futures agressions, on peut passer aux étapes concernant le renvoi de contact à proprement parler. C'est à ces étapes que la majorité du temps de développement a été dédié. Pour commencer nous allons voir comment le via est gravé ainsi que les écueils rencontrés. Nous justifierons ainsi les paramètres retenus pour ces gravures.

4.3) Gravure du via

Pour toute gravure, il convient d'abord de choisir le matériau qui pourra servir de masque durant la gravure. Dans notre cas, on compte graver le via en deux fois, d'abord le Ge à l'aide d'un plasma SF_6 puis les matériaux III-V à l'aide de la même recette de gravure plasma chloré que pour les mésas (cf Figure 4-3). Ces deux recettes peuvent être masquées par une résine[26], [27]. L'idée initiale était donc d'utiliser le même masque pour les deux gravures successivement. Le problème que l'on a rencontré est illustré par la Figure 4-9. On y voit une image en coupe au MEB de pics de matériaux III-V encore présents au fond du via après les deux gravures. Ces pics se retrouvent immédiatement sous le bord du masque de résine suspendu utilisé. En effet, la gravure SF_6 , de par son aspect isotrope, creuse sous le masque de gravure et on obtient un masque suspendu au-dessus du vide. On cherche donc à graver des matériaux III-V qui se trouvent très loin du masque utilisé ($\sim 170\mu\text{m}$). Cette recette étant très anisotrope on espérait que seules les zones sous l'ouverture allaient être gravées. On aurait eu une frontière nette entre les zones gravées et les zones masquées. Au contraire, les matériaux aux frontières de cette zone sont gravés plus faiblement. Seuls les ions dont la direction n'était pas purement verticale percutent ces surfaces extérieures. Ce flux faible et aléatoire d'ions mène à l'ouverture locale de couches difficiles à graver chimiquement. Une fois ces couches ouvertes, la gravure chimique des couches sous-jacentes ne fait qu'amplifier les disparités.



(a)



(b)

Figure 4-9 : Vue en coupe au MEB d'un phénomène de micro-masquage des III-V en fond de tranchée sous le masque suspendu. (a) Schéma de la zone touchée (b) Vue MEB en coupe des piliers de III-V

Ce phénomène est très gênant dans notre cas, car l'isolation des flancs des III-V est capitale, mais semble bien plus complexe si la topologie de cette zone est inconnue et non-contrôlée. Dans le souci d'éviter ces problèmes, un masquage différent est utilisé pour la gravure des matériaux III-V. La gravure retenue se fait en utilisant le Ge lui-même comme masque dur. Celui-ci est faiblement gravé par lors du traitement plasma utilisé et, quoique non-idéal, sera un masque suffisant. L'étalement en fond de via étant complexe comme on le verra dans la section suivante, on préfère cette solution plus simple. Cependant, elle exige de protéger la métallisation de base. Pour ce faire, un oxyde sacrificiel (SiO_x) a été déposé sur toute la surface de l'échantillon avant même la gravure du Ge (comme on l'avait mentionné avant le collage de la face avant). Cet oxyde sacrificiel devra être ouvert avant la gravure Ge. Pour ce faire, on utilise le même masque que pour les motifs de la métallisation de base (Hawaii BM). La gravure du SiO_x est effectuée par plasma dans notre cas. Cependant elle n'exige pas une grande précision et on pourrait envisager de la faire par voie humide. Il faudrait dans ce cas protéger le quartz de la face avant. L'échantillon avec l'oxyde de protection ouvert est représenté en Figure 4-10. Dorénavant la vue isométrique des schémas de ce type présentera la base de l'échantillon.

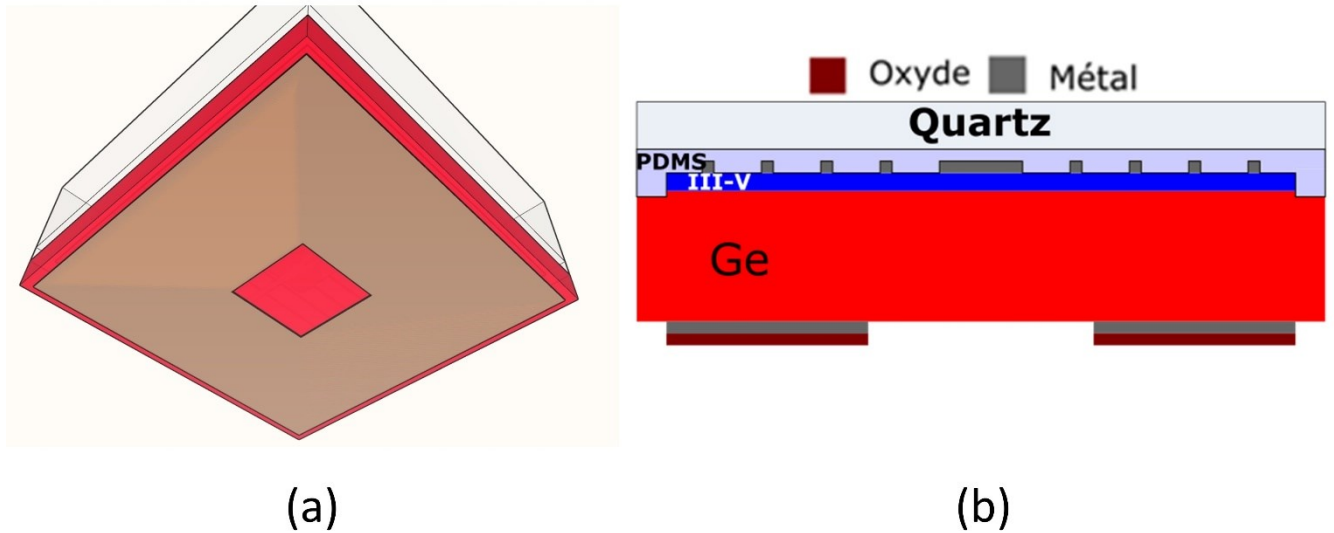


Figure 4-10 : Schémas d'une cellule prête pour l'ouverture du via. L'oxyde de protection a été ouvert en dehors des métallisations. (a) Vue isométrique d'un cellule par la face arrière. (b) Vue en coupe (coupe au centre de l'échantillon)

Maintenant que nous avons vu les étapes préliminaires aux deux gravures, nous allons traiter de la gravure SF_6 spécifiquement.

4.3) a) Gravure SF_6 du Ge

On cherche à graver un via profond de $170 \mu\text{m}$. La gravure de Ge est une gravure isotrope, car l'aspect chimique domine. Le motif est appliqué dans le masque de résine par photolithographie avec le masque Hawaii VO aligné sur des marques dédiées. La recette retenue, synthétisée en Figure 4-11 a été développée pendant le stage de Vitor Franceschini, un stagiaire qui travaillait sur la gravure SF_6 du Ge. La recette est composée de 5 cycles de 7/7/7/7/4min de gravure SF_6 . La raison pour laquelle on procède par cycles est l'accumulation de sous-produits soufrés. Il est courant d'adjoindre un flux d'oxygène au plasma SF pour retirer lesdits produits soufrés formés, mais une valve dédiée empêche la présence de ces deux gaz simultanément dans la chambre sur notre machine (car le SF_6 rentre par une ligne de gaz initialement dédié au méthane qui réagit facilement avec l'oxygène).

SF6_XAV
P = 25mT
SF ₆ flow: 65 sccm
P _C = 900 W
P _P = 10 W
t = 4*7min+4min (32min)
T = 20 °C

Figure 4-11 : Paramètres de la recette de plasma retenue pour l'ouverture du via dans le Ge par plasma Sf₆

La gravure se développe d'abord de manière isotrope jusqu'à atteindre la couche de nucléation de l'épitaxie que ce plasma ne parvient pas à affecter. Elle s'étend alors latéralement entre le masque de résine et cette couche de nucléation. La durée du dernier cycle (4min) peut être ajustée pour faire varier la durée de cette gravure latérale, faisant ainsi varier l'ouverture du via. Dans notre cas, utiliser 4 minutes permet d'obtenir un via dont l'ouverture à la surface est oblongue de grand axe 420 μm et de petit axe 280 μm . La Figure 4-12 présente deux vues au microscope optique de ladite couche de nucléation après retrait du masque de résine. On distingue sur la Figure 4-12(a) de petits dépôts noirs dont la nature est inconnue. Ceux-ci sont toujours observés après cette étape, mais leur fréquence varie beaucoup d'un échantillon à l'autre. Sur la base d'observations EDX, on suppose qu'il s'agit d'agglomérats de Ge, mais leur présence semble compliquée à justifier. Cependant, on a découvert par hasard que le développeur de résine MF-319 (à base de TMAH) supprime ces dépôts en 3 minutes ce qui mène à la Figure 4-12(b). On y observe la même couche de nucléation après nettoyage au MF-319 et on constate l'absence de tout dépôt visible. Sans connaître la nature exacte de ces dépôts on est donc capable de les supprimer.

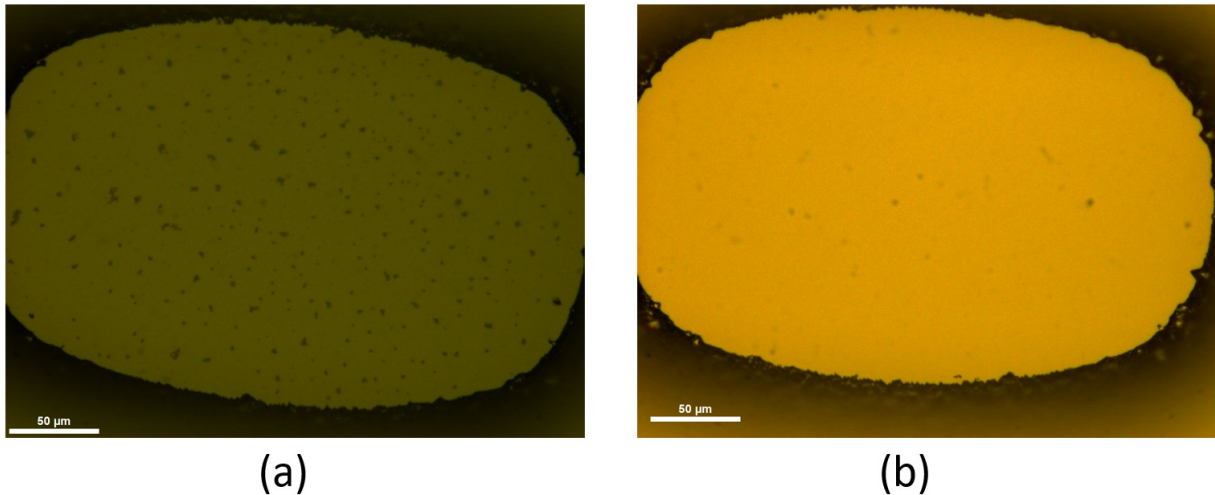


Figure 4-12 : Vue au microscope optique de deux tranchées après l'étape de gravure SF_6 du Ge. (a) la couche de nucléation porte les pollutions non-identifiées. (b) résultat après 3 minutes dans MF-319 (les traces restantes sont sur l'objectif)

Si la recette retenue fonctionne bien on pourrait certainement l'optimiser à la lumière des difficultés rencontrées dans les autres étapes. On pourrait notamment tenter de modifier le profil obtenu après gravure Ge pour avoir des angles moins saillants en fin de gravure. En effet, ces angles (visibles sur la figure 4.13 (b)) perturbent le flot de résine dans l'étape suivante. Ces possibles développements seront détaillés dans la section perspective de la conclusion. Après cette gravure, on retire le masque de résine et on obtient un échantillon tel que celui schématisé en Figure 4-13. Par souci de simplicité, le via est ici dessiné circulaire, mais en réalité sa forme est oblongue. Nous allons maintenant parler de la gravure des matériaux III-V.

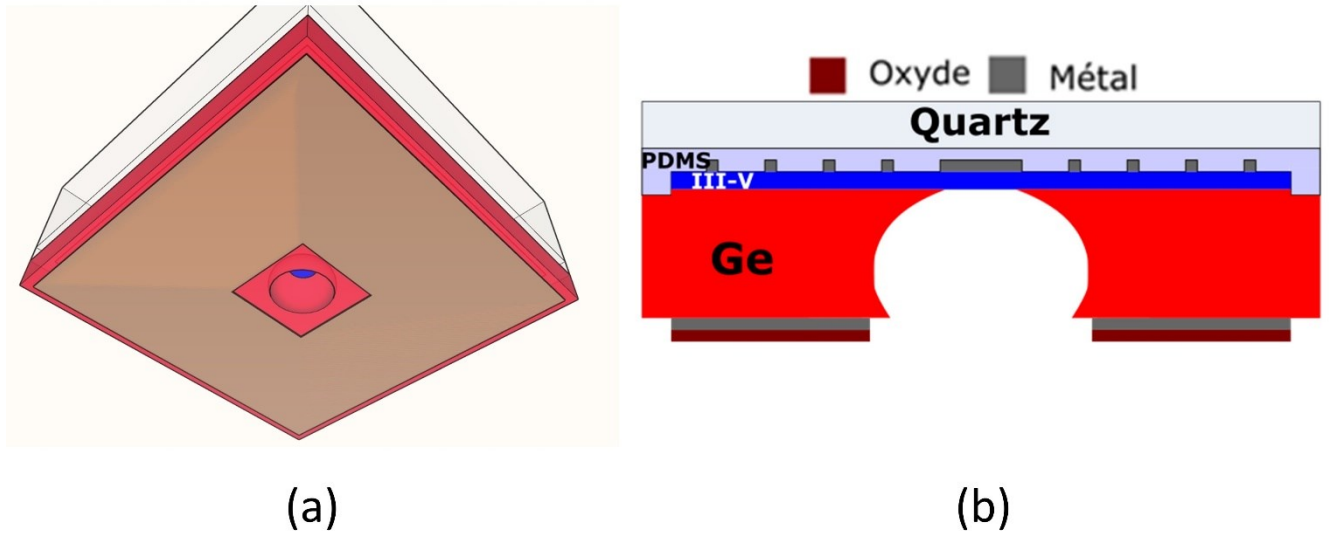


Figure 4-13 : Schémas d'un échantillon dont la partie Ge du via vient d'être gravée. (a) Vue isométrique d'une cellule par la face arrière. (b) Vue en coupe (coupe au centre de l'échantillon)

4.3) b) Gravure des matériaux III-V

Comme nous en avons discuté dans la 4.3) a) et dans l'introduction de cette section, la gravure des couches III-V en fond de via est effectuée par plasma, avec la même recette que les mésas (8,6 μm environ). Le Ge sert de masque dur (gravure auto-alignée) et une couche d'oxyde pour protéger la métallisation de base. Pour suivre l'évolution de cette gravure, un spectroscope mesure l'émission optique du plasma. On peut alors tracer en fonction du temps l'émission optique à une longueur d'onde caractéristique d'un matériau à graver ; la Figure 4-14 expose un de ces graphiques pendant la gravure d'un via. On y observe une courbe représentant l'intensité d'émission du pic de gallium en fonction du temps de procédé écoulé. On peut y détecter la gravure des différentes couches comme on l'a annoté sur la figure. Dans notre cas on veut couper le plasma lorsque l'on a fini de graver la couche contact (il reste cette couche partout sous la métallisation de la face avant). La gravure de cette couche est détectable par l'apparition d'un pic au niveau de la raie d'émission du Ga. Ce pic est identifié sur la Figure 4-14. C'est précisément cet arrêt qui fut un défi dans le développement de cette étape. Un arrêt trop rapide mène à un reste de matériau à graver dans ces couches, alors qu'un arrêt trop tardif mène à une attaque de la couche métallique sous-jacente. L'arrêt au moment exact n'a pas pu être atteint de manière reproductible.

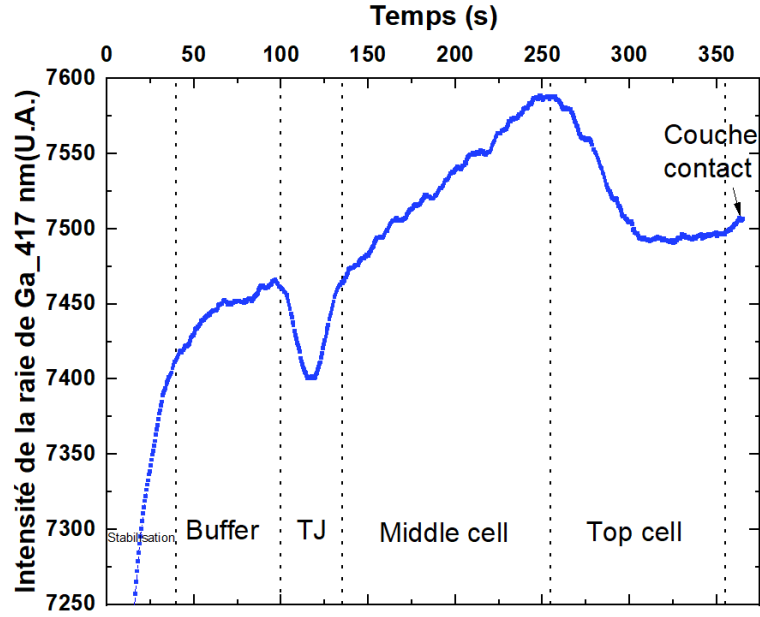


Figure 4-14 : Courbe de l'intensité d'émission de la raie de Ga en fonction du temps de procédé écoulé. Mesure obtenue grâce au spectroscopie permettant de suivre l'évolution de la gravure plasma.

La première approche pour remédier à ce problème fut d'utiliser du Ni comme première couche dans la métallisation. L'empilement Ni-Ge-Ni permet de former un contact ohmique sur la couche contact. Par ailleurs le Ni ne devrait pas être attaqué chimiquement par la gravure plasma[56]. Malheureusement la gravure ne semble jamais homogène. On constate toujours des dégâts localisés sur la membrane métallique. La Figure 4-15 présente une image au microscope optique d'une membrane qui porte ces dégâts. On y observe de nombreux petits points noirs. Deux explications sont possibles. Soit le dépôt métallique comprend des défauts qui sont attaqués plus vite (physiquement ou chimiquement), menant aux petits trous observés, soit la gravure elle-même attaque plus vite certains points des III-V exposant ainsi la membrane métallique au bombardement ionique prématurément. Le résultat conduit de toute façon à la conclusion que le métal sous-jacent sera exposé au plasma considéré.

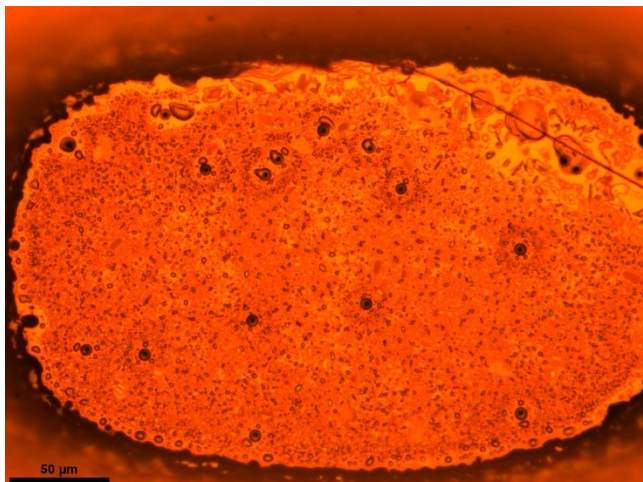


Figure 4-15 : Image au microscope optique d'une membrane métallique après gravure III-V du via. On constate de très nombreux petits défauts (points noirs).

Dans les premiers tests, l'Aluminium était utilisé comme couche épaisse de métal. Dès la sortie de la chambre de gravure, on observait des infiltrations dans la membrane métallique qui menaient à la rupture de celle-ci. La réaction chimique produisait de petites bulles et son avancée rapide était visible au microscope. La Figure 4-16 présente deux images au microscope optique d'une telle membrane. On constate que le défaut est visible des deux côtés. Avec une symétrie miroir, on peut superposer les images (a) et (b). La progression de ce défaut était visible en temps réel au microscope et des bulles microscopiques se dégageaient rapidement.

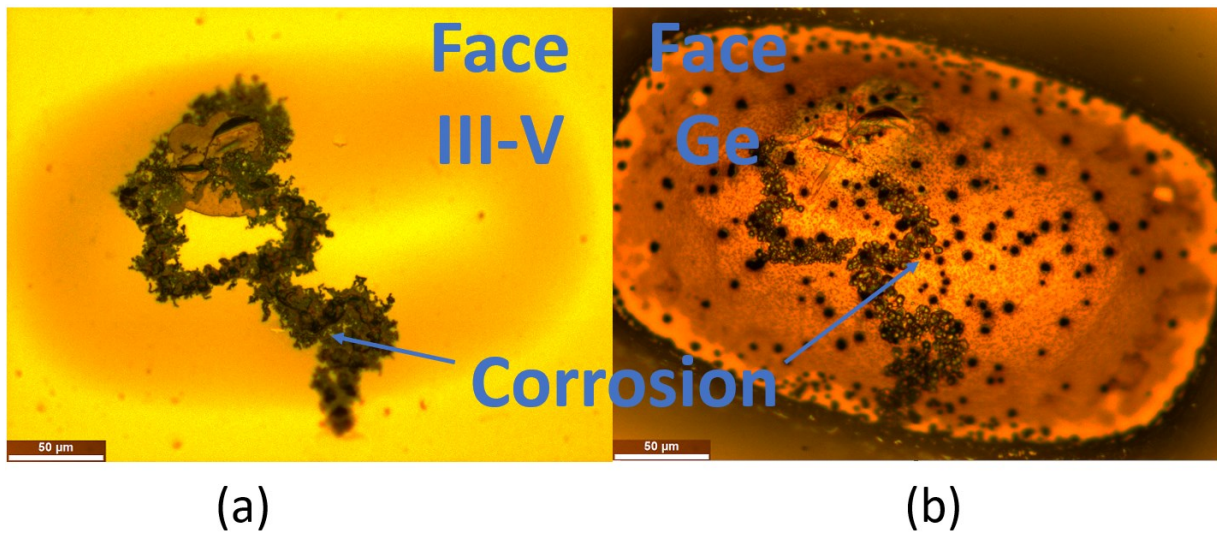


Figure 4-16 : Images au microscope optique des deux faces d'une même membrane attaquée dont l'aluminium est dégradé. Avec une symétrie miroir, on peut replacer les défauts l'un sur l'autre

L'explication suggérée par la littérature [56], est la suivante: l'aluminium, au contact de Chlore se lie à celui-ci pour former le composé déliquescent AlCl_3 . Au contact de l'humidité ambiante, ce composé réagit pour former $\text{Al}(\text{OH})_3$ un composé plus stable accompagné d'acide chlorhydrique ($3 \times \text{HCl}$). L'apport supplémentaire d'eau permet de former un nouveau composé qui peut spontanément se décomposer en alumine accompagnée d'eau et d'acide chlorhydrique. HCl réagit alors avec les atomes d'aluminium voisins pour former AlCl_3 et du dihydrogène (les petites bulles observées au microscope). Cette série de 4 réactions, résumées en Figure 4-17 permettent donc la transformation de l'aluminium en alumine tant que le système est capable de capter l'eau dans l'air ambiant. En effet, l'alumine est formée sans perte de Cl. Si l'on résume ces 4 équations en une seule, 2 Al et 3 molécules d'eau sont consommés pour former Al_2O_3 et rejeter 2 molécules de dihydrogène. La limitation de la réaction est donc l'apport en eau. La progression est donc endiguée quand l'humidité ne peut atteindre le site de réaction. Les couches Ni-Ge-Ni encore présentes bloquent cet apport. Les atomes de Cl sont donc finalement piégés au bout des lignes de corrosion

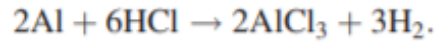
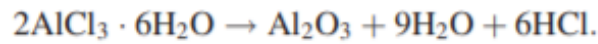
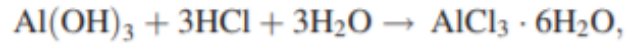
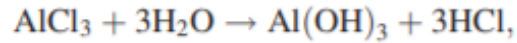


Figure 4-17 : Équations des 4 réactions chimiques mises en jeu dans le phénomène de corrosion de l'aluminium. Extrait de [56]

Ce problème justifie le choix de l'or pour le métal épais de la face avant. Sachant que les perforations de la membrane étaient inévitables, on ne pouvait accepter l'usage d'aluminium ni d'argent qui serait exposé dans la machine. L'arrêt sur la métallisation Ni-Ge-Ni-Au ne pose pas de problème, car même si l'on perce le Ni, l'Au ne réagira pas en chaîne avec le Cl. Au meilleur de nos connaissances, le composé AuCl_3 peut être formé, mais celui-ci ne suivra pas les mêmes réactions notamment parce que l'oxyde d'or (Au_2O_3) ne se forme pas à température ambiante et est instable[57].

Le via est donc maintenant ouvert grâce à la gravure plasma en deux temps de celui-ci. On obtient un échantillon tel que celui représenté en Figure 4-18. Il faut maintenant isoler les flancs du via que l'on vient de graver.

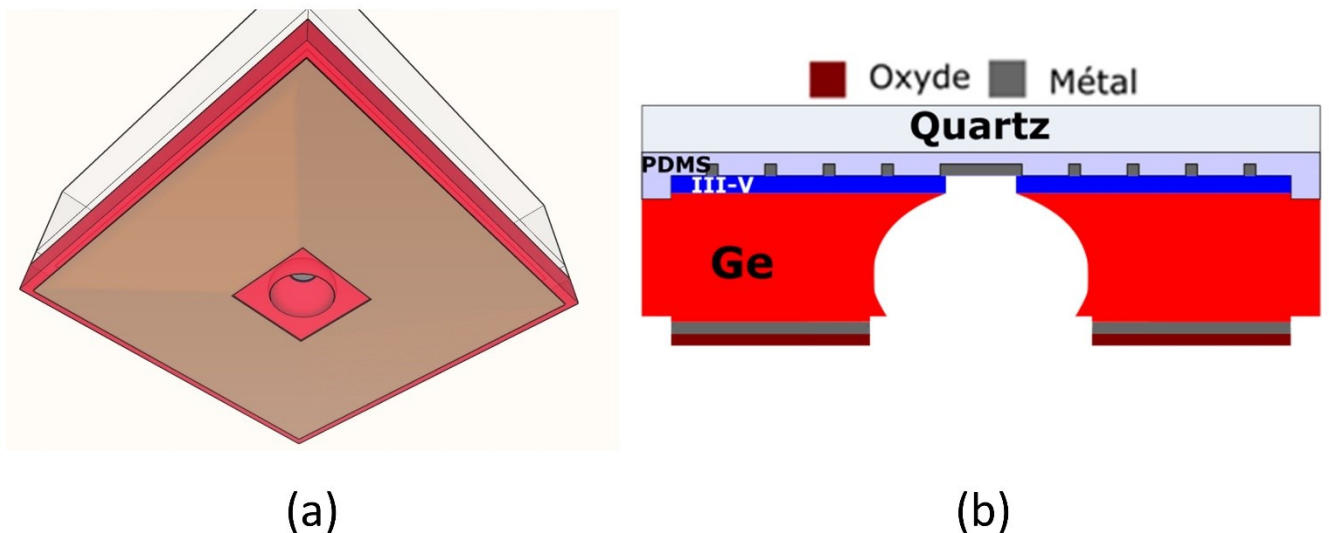


Figure 4-18 : Schémas d'un échantillon après la gravure III-V du via. (a) Vue isométrique d'une cellule par la face arrière. (b) Vue en coupe (coupe au centre de l'échantillon)

Avant de songer à l'isolation du via, notons que l'oxyde de protection qui avait été déposé sur le contact de base a été entamé par la gravure III-V, mais reste présent. Le contact de base doit donc être ouvert localement grâce à une gravure plasma CF_4 (masque de résine obtenu par lithographie avec le masque Hawaii BO). La machine utilisée est la RIE March présente en salle blanche, la vanne est ouverte à 74% et la puissance appliquée est de 300W. On procède par cycles successifs de 2min30s afin d'éviter la surchauffe de l'échantillon. On obtient un échantillon semblable aux schémas de la Figure 4-19.

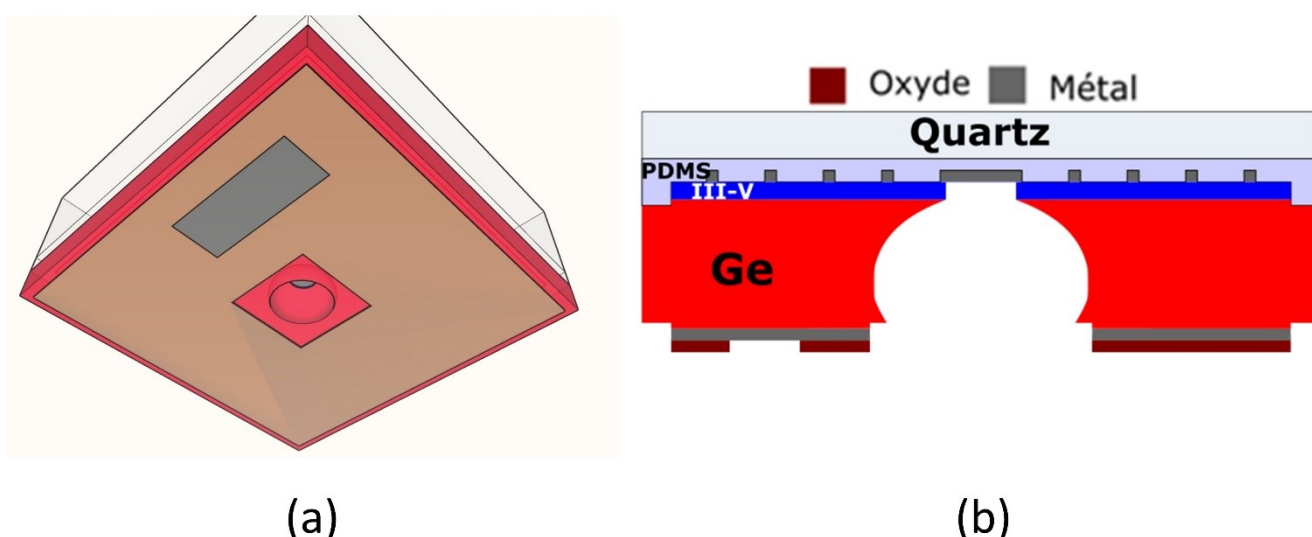


Figure 4-19 : Schémas d'un échantillon dont l'oxyde de protection vient d'être ouvert révélant le contact de base. (a) Vue isométrique d'une cellule par la face arrière. (b) Vue en coupe (coupe au centre de l'échantillon)

Dans cette section nous avons vu comment le via était gravé à l'aide de deux plasmas successifs de chimies différentes. Chacune de ces étapes mériterait de plus amples développements. L'échantillon porte maintenant un via aligné sous la métallisation avant. Le contact de base est également ouvert localement pour éviter tout court-circuit par bavure de la sérigraphie manuelle.

4.4) Isolation diélectrique du via

Comme nous l'avons vu précédemment, il est prévu d'utiliser un étalement de SU-8 pour isoler électriquement les tranchées (180 μm de profondeur environ). Nous ne traiterons pas ici toutes les étapes de développement, mais nous nous contenterons

de lister les défis et obstacles rencontrés afin de justifier la recette retenue. L'étalement sur une topographie élevée n'est pas chose aisée. Dans notre cas certaines zones de la tranchée se révèlent plus critiques. La Figure 4-20(a) montre une vue en coupe au microscope électronique d'un via creusé dans un échantillon test de Si contenant de la SU-8. Les zones critiques sont entourées en bleu. Le coin supérieur (Ge) est très complexe à couvrir notamment à cause du fait que c'est un angle aigu. La résine tend donc à se retirer de cette zone. Le fond de la tranchée est également une zone critique, car c'est ici que la couche de SU-8 sera la plus mince entre la métallisation et le substrat. Un défaut à cet endroit est donc plus probable. Lorsque l'on travaille sur les vrais matériaux, on a un changement de profil à cet endroit signe de la gravure en 2 temps. On constate aussi une accumulation importante de résine au fond du via ($\sim 85\text{ }\mu\text{m}$ contre $\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ en surface), car celle-ci est piégée à la manière d'eau qui s'accumule dans un trou.

La Figure 4-20(b) quant à elle est une image MEB en coupe d'un échantillon dont la tranchée a piégé une bulle d'air. Lors du dépôt de la résine (avant le spin) la résine ne pénètre pas toujours jusqu'au fond de la tranchée. Pour solutionner ce problème, les échantillons sont placés juste avant l'étalement dans un dessiccateur dans lequel on fait le vide afin de faire augmenter le volume de ces bulles et ainsi les aider à quitter le fond de la tranchée pour remonter à la surface (on augmente la poussée d'Archimède qu'elles subissent). En cassant le vide, on peut parfois rompre ces bulles, mais si ce n'est pas le cas, il convient d'extraire ces bulles à la pipette avant de procéder à l'étalement. Cette solution très manuelle n'est pas industrialisable. On a choisi de ne pas travailler davantage sur le caractère industrialisable de cette étape. En effet, si le procédé venait à être industrialisé, on pense que l'application de résine SU-8 se ferait plutôt par spray-coating (et donc sans bulles). Il n'était donc pas pertinent d'investir trop d'efforts ici.

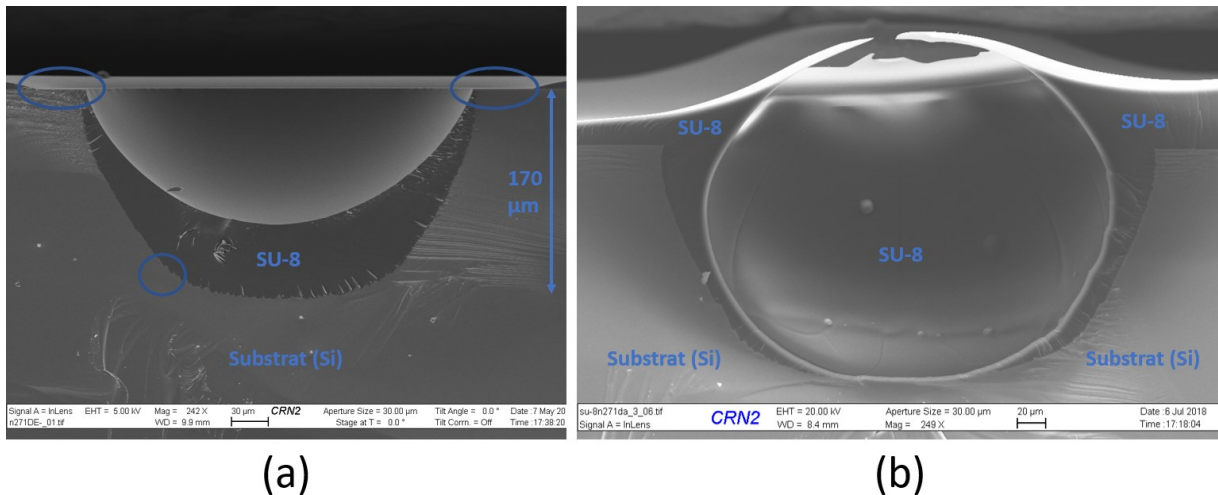


Figure 4-20: Vue MEB en coupe de deux tranchées de 170 μm de profondeur dans du Si. Ces tranchées sont partiellement remplies de résine SU-8. (a) Vue d'une tranchée partiellement remplie illustrant les défis rencontrés. (b) Vue d'une tranchée où la résine a piégé une bulle

Pour régler le problème de la couverture des angles et simplifier la lithographie, il a été choisi de remplir entièrement la tranchée de résine afin d'aplanir au maximum la surface. Pour ce faire, plusieurs étalements successifs sont utilisés. On étale de la résine, puis on la recuit pour supprimer les solvants et former un film solide. On peut alors immédiatement ajouter une couche de résine par-dessus celle-ci puis la recuire. On obtient ainsi une couche deux fois plus épaisse sur les surfaces planes. Les surfaces en creux telles que les vias piégeant la résine vont voir une plus grande accumulation. Cet effet tend à donner une surface d'autant plus plane qu'on ajoute de couches. Bien sûr, on ne veut pas une couche infiniment épaisse de résine. On doit donc choisir un compromis entre planéité et épaisseur de résine étalée. Un exemple du résultat final obtenu dans une tranchée est donné en Figure 4-21. Il s'agit d'une vue en coupe au MEB. Cette coupe a été faite sur un échantillon terminé en passant à côté du centre métallisé du via. La pâte d'argent est donc déjà présente.

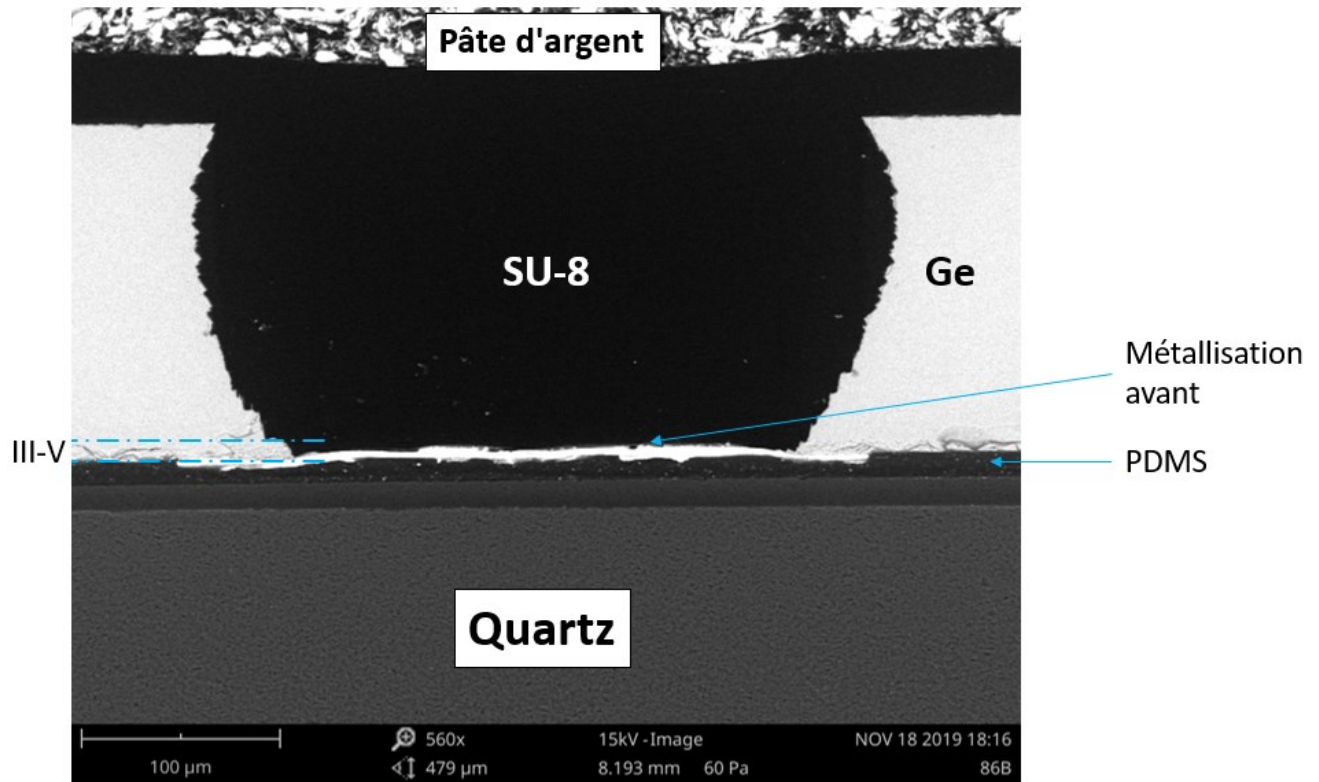


Figure 4-21 : Vue en coupe au MEB d'une tranchée remplie de SU-8.

Le problème des bulles se révèle plus complexe. L'usage de résines plus visqueuses permet d'aplanir plus efficacement, mais augmente le nombre de bulles formées. Qui plus est, ces bulles sont plus complexes à retirer, car leur mouvement est entravé par la viscosité du fluide dans lequel elles évoluent. On notera que plus le trou à combler est profond et plus les angles au sommet du via sont aigus, plus une bulle risque d'être piégée. La solution est donc de choisir une résine fluide pour la première couche de résine. L'usage de SU-8 2005 pour cette première couche permet un retrait relativement facile des bulles formées (viscosité : 45 cSt)). La résine, piégée en fond de via par la forme de celui-ci va s'accumuler au fond, mais ne laisser qu'une mince couche sur les surfaces planes. De la résine plus visqueuse peut alors être utilisée par la suite, car le via partiellement rempli piègera moins de bulles. On enchaîne donc par l'étalement de deux couches de résine visqueuse.

Cette résine plus visqueuse est obtenue par dilution de la résine SU-8 2150. La viscosité de celle-ci est inconnue, car la bouteille a perdu des solvants (viscosité

supérieure à la valeur initiale de 80 000 cSt). La dilution est donc faite par ajout de SU-8 thinner (i.e. du cyclopentanone, le solvant majoritaire de la SU-8 "série 2000"). Les fiches techniques des résines SU-8[40] indiquent la concentration massique en polymères des résines c'est donc cet indicateur que nous allons utiliser pour la dilution. Il sera par ailleurs bien plus facile de peser la résine sur une balance de précision que d'en prélever un volume du fait de sa viscosité extrêmement élevée. Toutes les concentrations évoquées ici sont donc des concentrations massiques. La dilution finale utilisée est à 78% de la concentration initiale (soit une dilution (SU-8 2150 : cyclopentanone) à (1 : 0,28)). Le calcul utilisé est le suivant :

$$m_{\text{solvant}} = m_{\text{SU-8 init}} * \left(\frac{1}{0.78} - 1 \right) \simeq m_{\text{SU-8 init}} * 0.28$$

Avec m_{solvant} la masse de solvant ajouté et $m_{\text{SU-8 init}}$ la masse de SU-8 2150 initiale. Cette formule découle de l'égalité :

$$m_{\text{finale}} * [C_{\text{finale}}] = m_{\text{SU-8 init}} * [C_{\text{init}}]$$

Avec m_{finale} la masse finale du mélange, $[C_{\text{finale}}]$ et $[C_{\text{init}}]$ les concentrations massiques finales et initiales respectivement. Ici les deux termes sont égaux au poids de solides présents qui reste inchangé durant la dilution. Or :

$$m_{\text{finale}} = m_{\text{SU-8 init}} + m_{\text{solvant}}$$

Malheureusement, comme la concentration initiale n'est pas connue en absolue (la bouteille a perdu des solvants) la résine finale ne peut qu'avoir une concentration relative. La concentration initiale est donc la référence. Par conséquent $[C_{\text{init}}] = 1$ dans nos calculs. Ainsi en remplaçant dans la deuxième égalité m_{finale} , $[C_{\text{finale}}]$ et $[C_{\text{init}}]$ par $(m_{\text{SU-8 init}} + m_{\text{solvant}})$, 0.78 et 1 respectivement, on obtient l'égalité initiale.

Comme nous l'avons vu, les paramètres sont obtenus par itération. Cependant l'article des **Anhoj et al.** [58] a été d'une précieuse aide pour donner des points de départ et des explications aux phénomènes observés. Il s'agit d'une étude détaillée de

l'influence de différents paramètres sur les résultats de la photolithographie de SU-8. Dans leurs cas ils utilisent la génération précédente de SU-8. Le polymère est le même, mais le solvant est différent (γ -butyrolactone). Ils visent des résultats bien plus précis que les nôtres sur des couches de 40 μm destinées à des structures optiques. Ils rapportent les mêmes problèmes de délamination et de fractures et proposent des pistes pour les régler. On pourrait essayer d'augmenter la température de soft-bake contre la délamination au risque d'augmenter la fréquence des fractures. C'est de cet article que vient l'idée de laisser reposer la SU-8 une nuit après le PEB avant développement. Pour rappel le PEB est un recuit nécessaire entre l'exposition et le développement pour réticuler les zones exposées. Le temps de repos doit réduire les contraintes au prix d'une perte de résolution (14nm/h environ ce qui est négligeable devant la précision de nos motifs). De nombreux autres paramètres ont été extraits cet article (temps et température de soft-bake, développement en plusieurs bains et temps de relaxation entre PEB et développement).

La recette finale retenue est la suivante :

- Déshydratation et dépôt de HMDS (prime oven, cycle 0)
- Dépôt d'une sous-couche de SU-8 2005 (2000rpm 30s (programme PE2000 SU-8), recuit sur plaque, 95 °C 2 minutes) (ce recuit est arbitraire et suffisant, mais pourrait être plus long)
- Dépôt d'une couche de SU-8 2150 diluée à 78% 2000rpm 30s (même programme), recuit sur plaque, 95 °C 30 minutes
- Dépôt d'une deuxième couche de SU-8 2150 diluée à 78% 2000rpm 30s (même programme), recuit sur plaque, 95 °C 30 minutes
- Exposition : alignement sur niveau BM (marques dédiées), aligneuse OAI 200, moteur 10mA, dose 220mJ/cm². Masque Hawaii DI
- PEB 5min, 80°C, plaque chauffante
- Repos 12h minimum pour relaxation
- Immersion dans SU-8 developer, 6 minutes avec agitation. Rinçage dans un bain de SU-8 developer propre puis dans IPA

- Hard Bake 150 °C 15 minutes

Cette recette permet l'obtention de tranchées telles que celle présentée en Figure 4-22. Cette image obtenue par observation MEB d'un via fonctionnel vu en coupe porte déjà la sérigraphie d'argent. L'absence de continuité métallique apparente est due à une découpe trop loin du centre du via.

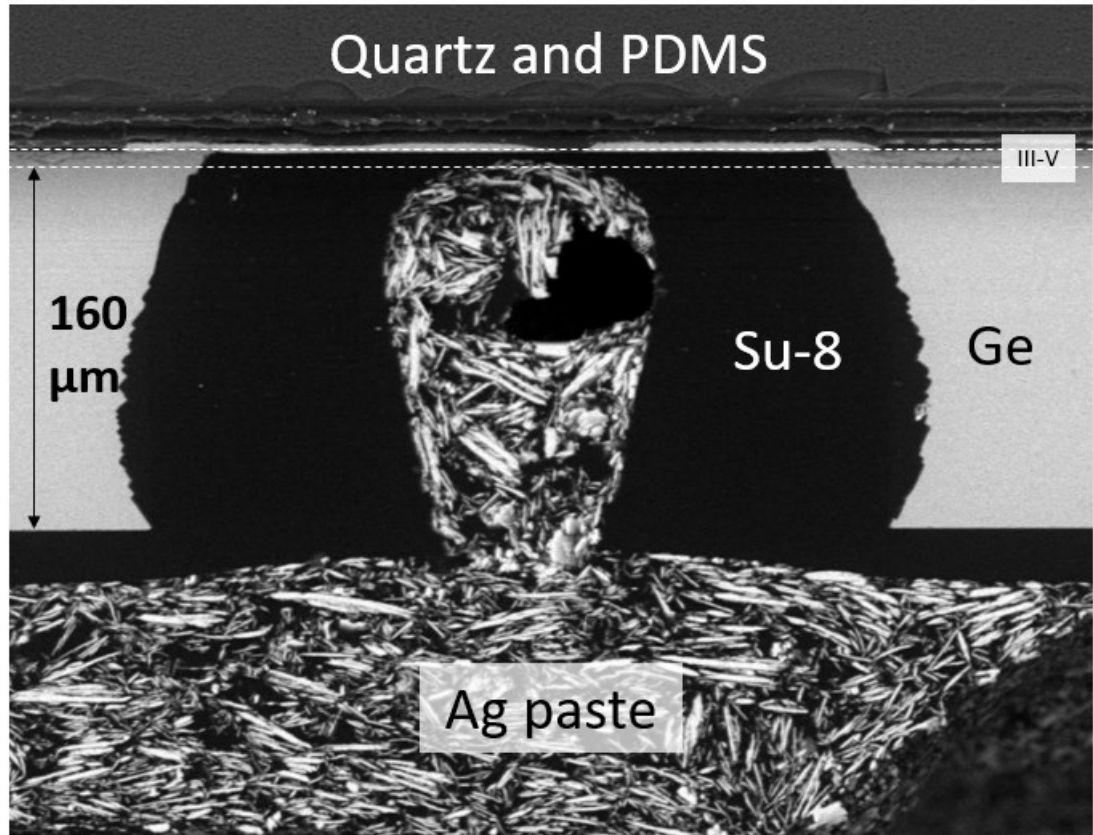


Figure 4-22 : Vue MEB en coupe d'un via fonctionnel. La section a manqué le milieu du via d'où l'absence de continuité métallique visible.

Dans cette section, nous avons vu quelles considérations ont guidé le développement de l'étape d'isolation diélectrique par résine SU-8. C'est l'étape qui a exigé le plus grand investissement de temps et davantage de temps pourrait y être consacré. Le résultat actuel est suffisant pour la création du premier prototype.

4.5) Métallisation par sérigraphie

Comme nous l'avons vu précédemment, la sérigraphie va être employée pour métalliser le via obtenu. Malheureusement, le matériel disponible en salle blanche ne permet pas de faire une sérigraphie précise. La pâte métallique utilisée est destinée à faire une soudure sur PCB et non à faire une sérigraphie. Celle-ci est faite à la main avec un pochoir en kapton. Ce film, (non collant ici) est aligné à la loupe binoculaire et maintenu en place à l'aide de tape bleu. La pâte est ensuite appliquée à l'aide d'un Q-tip au travers des ouvertures. La pâte est ensuite recuite à 115 °C pendant 15 minutes. Cette solution loin d'être idéale, implique des infiltrations de pâte sous le masque qui n'est pas collé. On a donc des pertes de dimensions très importantes. Par ailleurs la topographie de la métallisation obtenue reste très importante. On peut le voir sur la Figure 4-23. C'est une vue MEB en incidence oblique de l'échantillon présenté dans la Figure 4-22 précédemment. On y voit les variations de hauteur de la pâte. Les plus hauts pics atteignent $\sim 500 \mu\text{m}$ au-dessus de la surface de Ge d'après les mesures au profilomètre mécanique.

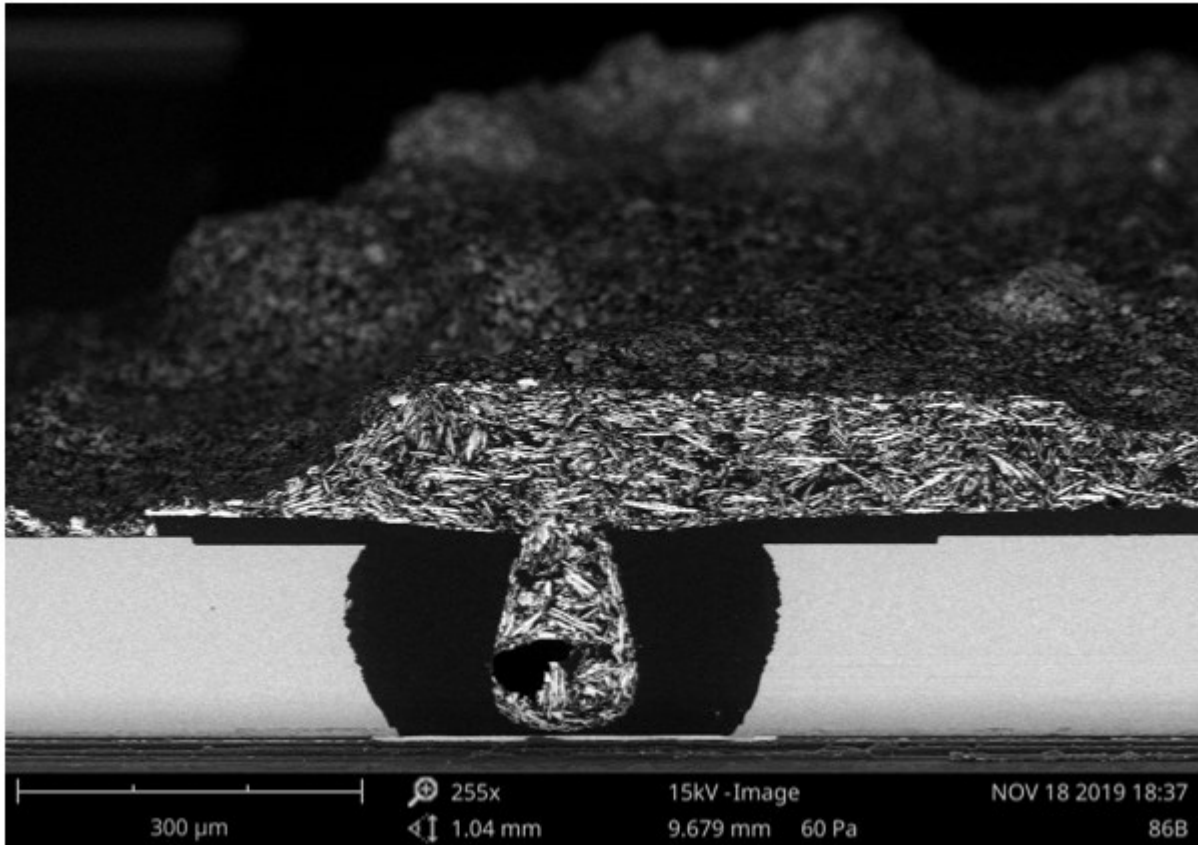


Figure 4-23: Vue MEB en incidence oblique d'une métallisation sérigraphiée. On voit de grandes différences de topographie selon les zones considérées.

De nombreux développements pourraient être consacrés à cette étape, mais n'ont pas été faits faute de temps. Il conviendrait d'acheter une pâte dédiée à la sérigraphie et éventuellement de trouver un masque qui pourrait adhérer sur l'échantillon pour contrer les infiltrations sous le masque. Celui-ci devra pouvoir être retiré avant le recuit de la pâte sans pour autant arracher la SU-8. On pourrait alors pousser davantage la pâte dans les tranchées sans risques de faire déborder la pâte dans des zones qui provoquent des courts-circuits. Les images récoltées sur les tranchées montrent que celles-ci ne sont pas toujours bien remplies et contiennent parfois des bulles. Un masque adapté et une pâte dédiée devraient permettre un meilleur contrôle des dimensions et un meilleur remplissage des vias. Il conviendrait alors de déterminer quels problèmes persistent pour décider des optimisations futures.

Dans cette partie, nous avons suivi le procédé FFF utilisé pour fabriquer des cellules triple jonction à contact face arrière fonctionnelles. Les défis rencontrés ont été explicités et les solutions retenues ont été justifiées. Il convient maintenant d'étudier les cellules fabriquées et leurs résultats électriques.

CHAPITRE 5: PERFORMANCES DES CELLULES FABRIQUÉES

Maintenant que le lecteur a toutes les informations nécessaires pour comprendre le procédé suivi par les cellules et les raisons qui ont guidé nos choix, nous allons regarder les caractéristiques des cellules obtenues ainsi que les techniques de caractérisation utilisées. Nous verrons comment les résultats obtenus ont inspiré ou exigé de nouveaux développements pour corriger des défauts. On séparera cette partie en 4 sous-sections distinctes correspondant chacune à un résultat et un nouveau développement.

5.1) Caractérisation des cellules

Au total, 4 cellules fonctionnelles ont été fabriquées. Celles-ci sont toutes issues du premier lot de cellules ayant suivi le procédé décrit ci-dessus (procédé FFF). Elles n'ont donc malheureusement pas été caractérisées avant le collage PDMS et l'ajout du via. On ne dispose donc pas de courbe de référence décrivant ce que l'on peut attendre de ces échantillons. Ce lot d'échantillons porte les numéros "Système de Suivi d'Échantillon" (SSE) O663A-C et O663V-W. Ceux-ci ont suivi ensemble toutes les étapes jusqu'à la gravure du via. Une fois le via gravé, on a arrêté la fabrication en groupe et l'ouverture du contact de base, l'isolation SU-8 et la sérigraphie étaient faites sur les échantillons un par un.

La première cellule fonctionnelle est une cellule de 1 cm par 1 cm issue du batch leader (O663C). Ce terme désigne le premier échantillon d'un lot. Il va subir les étapes en premier afin de détecter un éventuel problème avec l'étape avant de la faire subir au reste de l'échantillon. Cet échantillon a donc subi l'étalement d'isolant SU-8 immédiatement après la gravure du via avant de recevoir la métallisation par sérigraphie. L'oxyde protecteur restant n'était retiré qu'après la sérigraphie. Le contact de base a été ouvert par gravure au plasma CF_4 de l'oxyde protecteur. La SU-8 et la pâte d'argent ont été utilisées comme masque de gravure. Le masque permettant l'ouverture localisée du contact de base, décrit en Annexe A a été créé après.

Cet échantillon portait 3 cellules (1 cm et 2 cellules de 5 mm). Celles-ci ont été mesurées en obscurité. La cellule 1 cm fournissait une caractéristique de diode, mais sa tension de seuil d'environ 0,7 V était trop faible (cf. Figure 5-1). En effet, on attendrait plutôt une tension de seuil aux alentours de 2,5V, car elle devrait être proche du V_{OC} . Une des cellules 5mm représentait une caractéristique de diode avec un shunt très important (quasiment court-circuitée) alors que la dernière était court-circuitée (caractéristique I(V) d'une résistance).

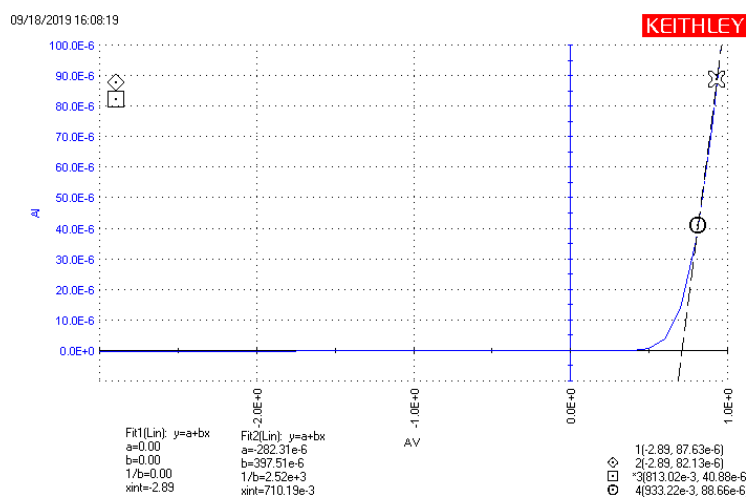


Figure 5-1 : Courbe I-V sous obscurité de la première cellule fonctionnelle.

5.1) a) Incompatibilité du montage 1-soleil classique

On a toutefois tenté de mesurer cette première cellule sous 1-soleil. Un schéma de la cellule et de la façon dont les contacts sont pris est donné en Figure 5-2(a). Le montage 1-soleil classique est fait d'une platine qui accueille la cellule (face avant tournée vers le plafond). Des pointes sur micromanipulateurs sont utilisées pour connecter le contact émetteur. Une lampe à arc au Xenon est ensuite amenée au-dessus de cette cellule. La lampe, équipée d'un filtre dédié, fournit un éclairage dont le spectre correspond au spectre standard AM 1.5 D.

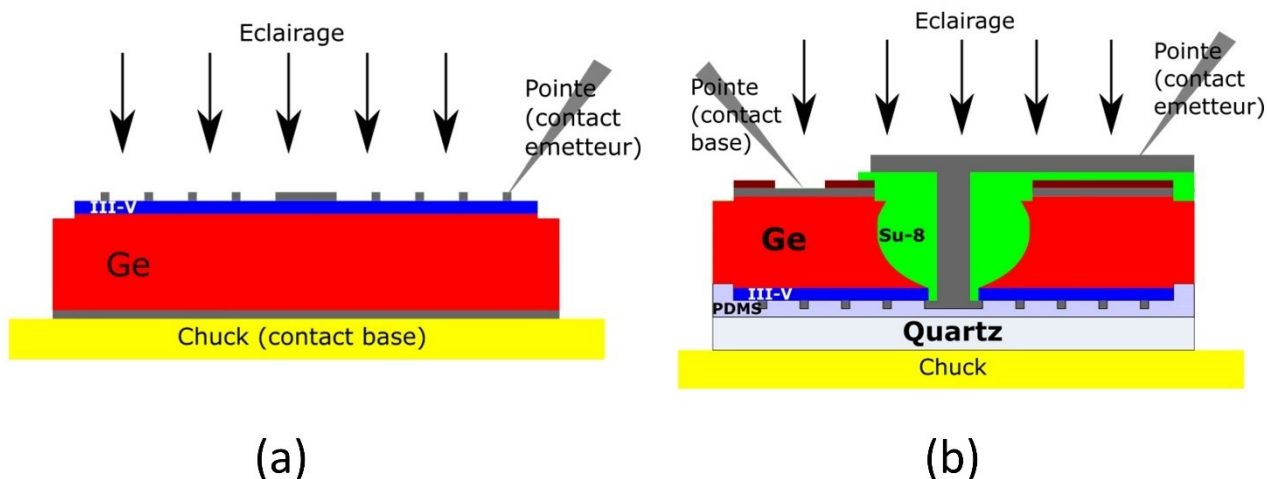


Figure 5-2 : Schémas illustrant le positionnement d'une cellule dans le montage 1-soleil classique. (a) Cellule standard, la mesure est possible. (b) Cellule à contact face arrière, on ne peut contacter séparément les électrodes et éclairer la cellule convenablement.

Comme on le voit sur la Figure 5-2(b), le montage implique que si l'on pose les pointes sur la face arrière de nos cellules, la face avant est alors dirigée vers la platine. On ne peut donc pas éclairer et mesurer les cellules à contact face arrière en même temps sur le simulateur 1-soleil existant. La première cellule fonctionnelle, dont la caractéristique I-V sous obscurité a été donnée en Figure 5-1, a été utilisée pour tenter de développer une technique permettant de contacter la face arrière pendant la mesure. Ainsi on pourrait poser la cellule dans le bon sens dans le simulateur. Les tentatives n'ont pas été fructueuses et un nouveau simulateur solaire a été développé.

5.1) b) Mise au point d'un montage 1-soleil adapté

La solution alternative a donc été d'utiliser l'ancien simulateur 1-soleil en conservant le système d'acquisition actuel. Il s'agit d'une enceinte Thermo Oriel 66902 de Newport Instruments[66] contenant aussi une lampe à arc au Xenon et son alimentation dédiée. Le faisceau horizontal sortant est redirigé à l'aide d'un miroir à 45°. On peut donc orienter ce miroir afin de renvoyer le faisceau en direction du plafond. On peut alors placer sur le chemin du faisceau une plaque transparente (ici un masque de photolithographie dont on a gravé le Chrome). Sur cette plaque la cellule peut être placée face avant vers la source afin que des micromanipulateurs équipés de

pointes puissent établir les contacts sur la face arrière maintenant visible. La Figure 5-3(a) est un schéma illustrant la configuration proposée. Une photographie de ce montage est donnée en Figure 5-3(b). Ainsi, on est capable de mesurer les cellules à face arrière sous éclairage. Au besoin, une binoculaire peut être temporairement ajoutée afin de contacter des zones précises. Une fois ce montage assemblé et réglé (lampe neuve et alignement des composants optiques), l'échantillon suivant pouvait être fabriqué, car il pouvait maintenant être caractérisé.

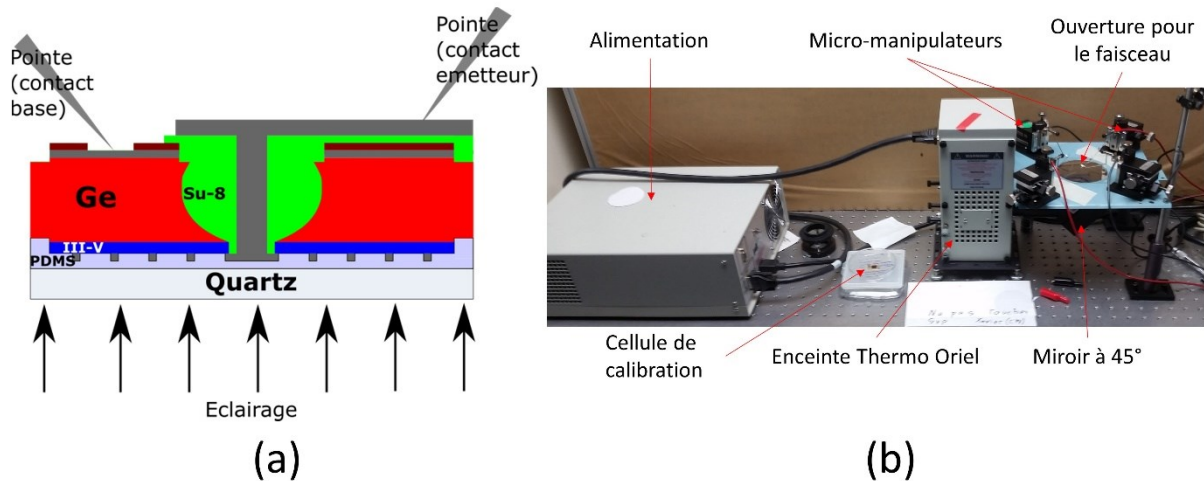


Figure 5-3: Schéma de l'enceinte utilisée et photo de montage réalisé pour la mesure des cellules à contacts face arrière. (a) Schéma en coupe d'une cellule en train d'être mesurée. (b) Photographie du montage

Les défauts de cette configuration temporaire sont les suivants:

- L'absence de contrôle spectral, car on ne possède pas le filtre nécessaire pour avoir un spectre AM 1,5D. Le spectre est donc exactement celui de la lampe à arc au Xe
- L'absence de contrôle en température. Sur la station classique, la platine est maintenue à 25°C.
- L'absence de "boîte" autour du montage pour couper la lumière extérieure. La lumière de la salle doit donc impérativement être coupée lors des mesures.
- L'absence de protection de l'utilisateur contre le rayonnement émis. L'absence de "boite" implique que si la lumière est allumée, on peut

observer directement le faisceau. Pour contrer ce danger, une plaque métallique noire est utilisée pour obstruer le faisceau lorsqu'il n'est pas utilisé. L'utilisateur doit aussi en tout temps porter des lunettes filtrantes si le faisceau n'est pas couvert.

Dans cette section, après une mesure sous obscurité d'une première cellule fonctionnelle, nous avons donc vu pourquoi la création d'un montage dédié a été nécessaire à la mesure de nos cellules. On a également vu que cette cellule fonctionnelle a été court-circuitée à la suite des manipulations qu'elle a subies lors de ses caractérisations. L'apparition de ce court-circuit témoigne d'un défaut d'isolation. Dans la section suivante, nous allons donc nous intéresser aux failles possibles dans l'isolation et nous verrons comment des mesures de renfort ont pu être appliquées.

5.2) Renforcement de l'isolation

Comme on l'a souvent dit, l'isolation électrique des flancs du via est primordiale au bon fonctionnement du dispositif, mais est aussi une des étapes les plus complexes à réussir et observer. Plusieurs défauts ont été envisagés pour expliquer l'origine de cette perte de l'isolation. Les deux premières hypothèses ont été écartées car jugée moins probables. Elles sont cependant explicitées ici car elles restent possibles.

Comme elle est apparue pendant des manipulations telles que le collage et le décollage d'un ruban adhésif, l'hypothèse d'un dommage mécanique prévalait. Il fallait alors localiser les endroits critiques susceptibles de court-circuiter l'échantillon à la suite d'un dommage. Le fond du via était évidemment un endroit suspect, mais très difficile à observer (situé entre plusieurs couches opaques). L'arrachage du ruban adhésif de Cuivre aurait pu décoller la SU-8 au fond du via, entraînant l'apparition d'un espace entre-les III-V et la SU-8. À partir de cette hypothèse, le déplacement de la pâte de sérigraphie ou de la métallisation avant pourrait être une cause de court-circuit. Cependant, la métallisation avant semble intacte lorsqu'on l'observe par la face avant. On aurait attendu une fracture ou au moins une modification visible là où débouche le via. La pâte d'argent quant à elle est rigide après son recuit de réticulation et il semble

difficilement envisageable qu'elle diffuse dans cet interstice jusqu'au flanc des III-V. Cette hypothèse est donc peu probable.

Dans des tests précédents on avait constaté l'apparition occasionnelle de fissures dans la SU-8 à la verticale de l'angle supérieur du via. Ce phénomène est montré en Figure 5-4(a) et (b). Une telle fissure aurait pu fournir un chemin de passage pour la pâte d'argent vers la surface de Ge. La pâte aurait pu s'y loger dès le dépôt de la pâte d'argent et les dommages mécaniques auraient permis la diffusion jusqu'à la surface du Ge. Cette hypothèse est un scénario plus crédible, mais aucune fissure n'avait été observée dans la SU-8 sur ces échantillons. Il aurait fallu qu'une telle fracture se forme pendant la sérigraphie, mais cependant sans s'ouvrir suffisamment pour permettre le passage immédiat de la pâte. Ce scénario semble également peu probable et difficilement observable.

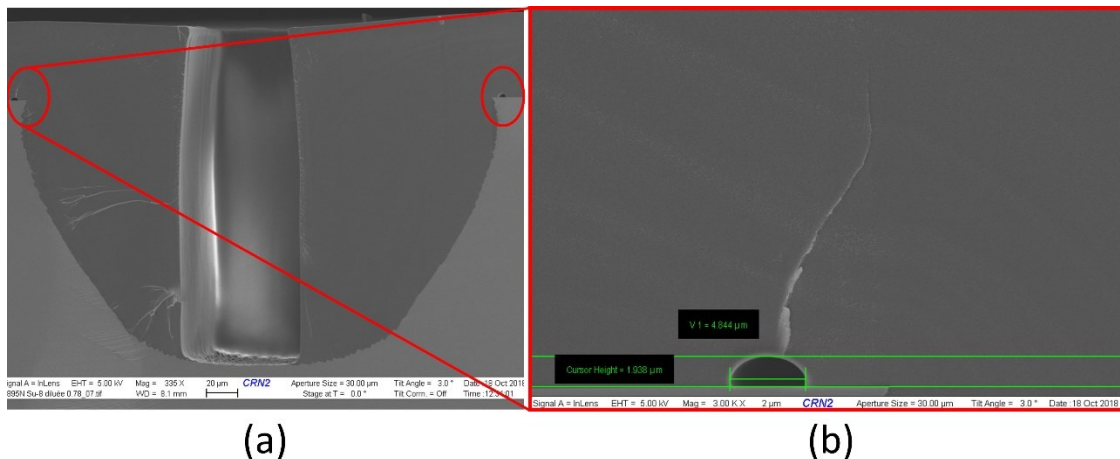


Figure 5-4 : Vue en coupe a MEB illustrant le problème de fissure sur les angles des tranchées. (a)vue générale de la tranchée (b)vue rapprochée d'une fissure

La troisième et dernière hypothèse concerne les bavures de la sérigraphie sous le pochoir utilisé pour celle-ci. En effet, comme nous l'avons vu dans la 4.5), la pâte s'immisce sous le masque, car celui-ci est simplement posé sur l'échantillon. La pâte déborde donc par endroit hors de l'isolation SU-8. L'oxyde de protection dans le cas de l'échantillon O663C avait été ôté en utilisant la sérigraphie en guise de masque. Une évolution de la pâte d'argent aurait donc pu finir par réaliser un contact avec la base du dispositif entraînant un court-circuit. Ce scénario semblait le plus probable. En effet,

cela revient à supposer que la pâte se soit affaissée d'environ 1 μm et ait descendu la marche d'oxyde. Le schéma de court-circuit envisagé est décrit dans la Figure 5-5. Le schéma (a) représente l'échantillon après gravure de l'oxyde et le schéma (b) la situation après affaissement de la pâte d'argent. La zone critique est entourée en bleu.

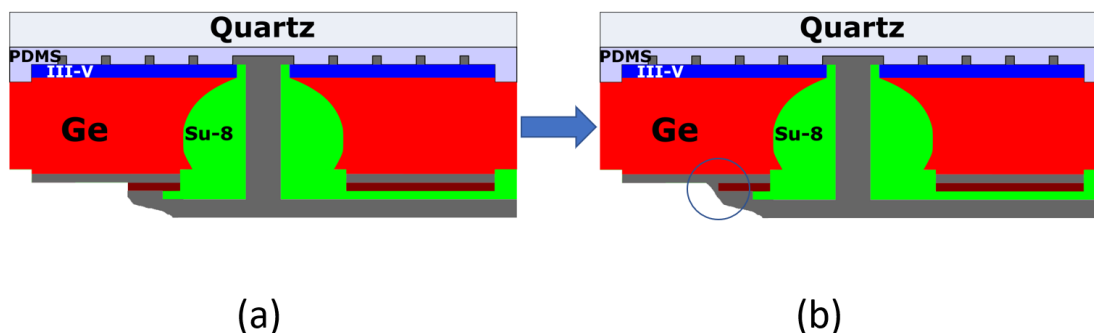


Figure 5-5 : Schéma illustrant le court-circuit envisagé. (a) Avant (b) Après, le court circuit est entouré en bleu

Pour contrer ces problèmes, l'ajout d'une fine couche d'oxyde (200 nm) sur l'échantillon suivant (O663W) a été décidé. Cet oxyde a été déposé par pulvérisation cathodique, car la machine de PECVD n'accepte pas les matériaux présents sur nos échantillons. Par ailleurs, on obtient une meilleure conformité par pulvérisation. On devrait ainsi mieux couvrir les zones sensibles au fond du via.

C'est aussi à ce moment que le masque d'ouverture des contacts de base décrit dans 3.2) a) a été développé. En ouvrant localement le contact de base, loin des débordements de la pâte d'argent, on espérait endiguer le problème décrit dans le paragraphe précédent. L'ouverture des contacts de base de l'échantillon O663W a donc été pratiquée par gravure plasma dans la machine RIE March avec les mêmes paramètres que précédemment (CF_4 74% 300 W, masque résine AZ9245). Après le retrait du masque de gravure, on enchaîne avec les étapes d'isolation diélectrique et la sérigraphie.

Cet échantillon (O663W) était un morceau incomplet venant du bord du wafer et ne portait que 2 cellules ainsi que beaucoup de défauts d'épitaxie. Les caractéristiques des 2 cellules étaient celles d'une résistance ce qui témoignait de cellules court-circuitées. Ce résultat décevant permettait d'affirmer que l'oxyde fin que

l'on avait ajouté n'avait pas réglé le problème. Nous en avons déduit que si le court-circuit venait du fond du via, la pulvérisation n'isolait pas cette zone. L'ajout de cette couche d'isolation ne semblant pas renforcer l'isolation, il a été convenu de ne pas l'appliquer sur les échantillons suivants.

5.3) Mesure de cellules fonctionnelles sous illumination

Suite aux résultats obtenus sur O633W nous avons mis en place une procédure pour identifier la source des courts-circuits et savoir si ceux-ci existaient avant même l'isolation SU8 et la sérigraphie. Pour ce faire, des courbes I-V sous obscurité ont été réalisées en posant une pointe de mesure directement au fond d'un via. En effet, les ouvertures de grandes dimensions permettent l'insertion d'une pointe montée dans un micromanipulateur. On peut alors directement poser cette pointe sur la surface de la membrane métallique en fond de via. Cette opération n'est pas sans risque d'où notre réticence à l'appliquer avant. On doit d'abord tordre une pointe de mesure afin de pouvoir l'insérer verticalement (sans tordre la pointe, elle toucherait le Ge du bord du via). Au microscope, on observe alors la descente d'une pointe dont l'axe est confondu avec la direction d'observation. Dès lors, évaluer l'espace restant entre la pointe et la membrane est complexe. Lorsque la pointe entre en contact avec la membrane métallique (1.1 μm) elle va inévitablement la perforer. Il est souvent difficile de s'assurer du contact avant d'observer un glissement latéral de la pointe qui va déchirer la membrane un peu plus.

Ces difficultés font qu'il est préférable de ne pas faire ces tests dans les vias des cellules à fabriquer afin de ne pas les endommager. On se sert donc des chaînes de vias qui ont été décrites dans la 3.2) a). Pour rappel, la Figure 5-6(a) illustre la configuration métallique que l'on s'attendait à avoir pour ces chaînes de via. Dans notre cas, comme la SU-8 et la sérigraphie ne sont pas encore faites, on effectue la mesure dans la configuration Figure 5-6(b). Des mesures ont donc été effectuées sous obscurité sur les 3 échantillons restants du lot de cellules (O663A&B, O663V). Seuls quelques motifs ont été mesurés dans un souci de ne pas briser trop de membranes. On a ainsi confirmé

que tous les vias fonctionnaient (tous présentaient une courbe de diode avec parfois un shunt).

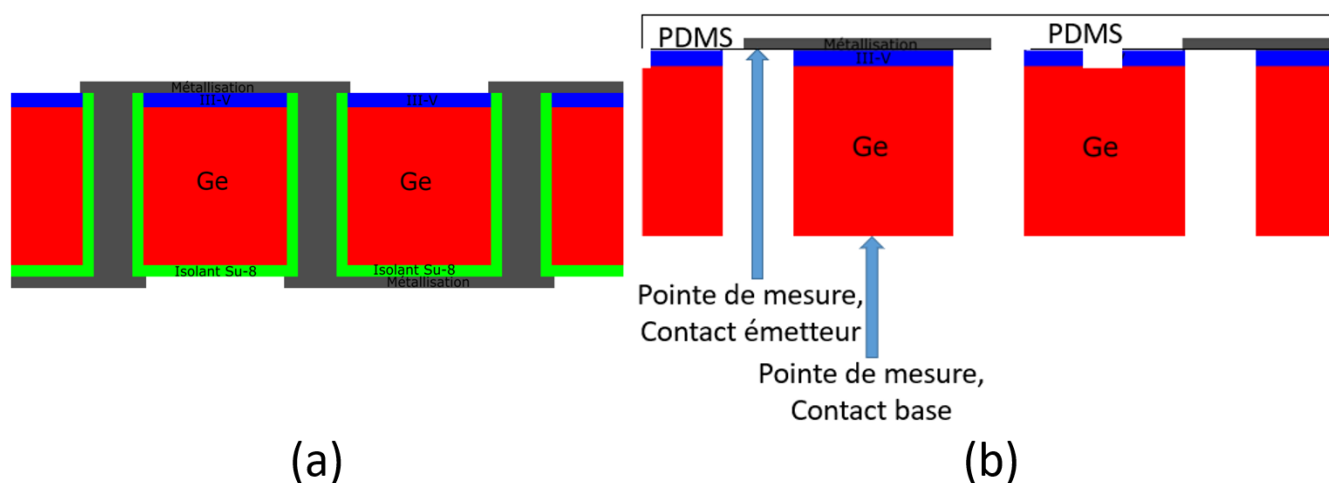


Figure 5-6 : Schéma en coupe des chaînes de vias utilisées. (a) Schéma de la configuration finale prévue. (b) Schéma des chaînes avant l'isolation SU-8 et la sérigraphie. Les flèches indiquent l'endroit où les pointes sont posées pour la mesure

À la suite de ce résultat, le contact de base a été ouvert dans les 3 échantillons restants. Le nouveau masque Hawaii BO (cf Annexe A) a été utilisé suivi de la même recette de plasma CF_4 que pour les autres échantillons. L'échantillon O663B dont les mesures en fond de via étaient moins bonnes a donc été sélectionné pour continuer le procédé.

Après isolation SU-8 et sérigraphie, celui-ci portait deux cellules fonctionnelles, dont les caractéristiques sous éclairage sont données en Figure 5-7. (Courbe bleue et rouge. La grise est celle d'une cellule standard donnée comme référence). On constate que les caractéristiques sont proches d'une cellule fonctionnelle classique malgré un défaut proche de $V=0,4$ V. Le V_{OC} (2.38 V) est légèrement faible ce qui pourrait être attribué aux nombreuses manipulations subies. L'importante surface de Ge exposée par la gravure du via pourrait aussi être mise en cause. Cette surface très rugueuse pourrait fournir de nombreux pièges favorisant les recombinaisons. La passivation des flancs n'a pas été faite, mais devrait rétablir au moins partiellement la valeur du V_{OC} (flancs Ge et III-V). En revanche, les J_{SC} sont étonnamment élevés pour une cellule sans couche antireflet. Cette valeur élevée est attribuée à la déviation observée aux alentours de 0,4

V. Si l'on en croit la littérature[67], cette déformation de la courbe témoigne d'un shunt sur l'une des sous-jonctions de la cellule. On attendait plutôt un J_{SC} légèrement faible du fait du collage Quartz/PDMS qui devrait le réduire. Si l'on considère que les plateaux sont la "vraie" valeur des J_{SC} , ceux-ci deviennent 9,9 et 8,9 mA/cm^2 pour les courbes rouge et bleue respectivement. Cette valeur un peu faible est bien plus cohérente pour des premières cellules partiellement shuntées sans couche anti reflet et dont la face avant est collée.

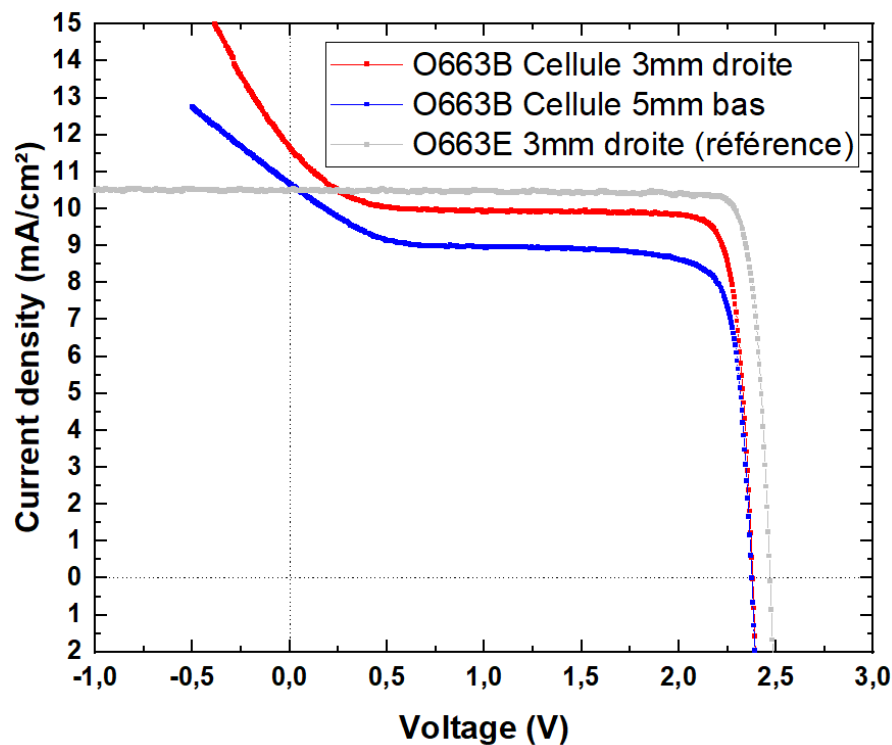


Figure 5-7 : Courbes $I(V)$ de 3 cellules solaires sous illumination 1-soleil. En rouge et en bleu, les courbes de 2 cellules à contact face arrière fonctionnelles. La courbe en gris clair est une cellule standard fabriquée à partir des même matériaux. Celle-ci est proposée en guise de référence à atteindre.

La Figure 5-8 présente la courbe sous obscurité de ces cellules (avec la même cellule de référence en gris). On constate que la déviation autour de 0 V n'est pas observable sous obscurité. On ne peut donc exclure que la première cellule fonctionnelle précédemment décrite ai eu un tel défaut (cellule 1 cm sur O663C). En effet cette cellule n'avait été caractérisée que sous obscurité. En revanche on constate quand même un shunt dans la courbe bleue (cellule 5mm)

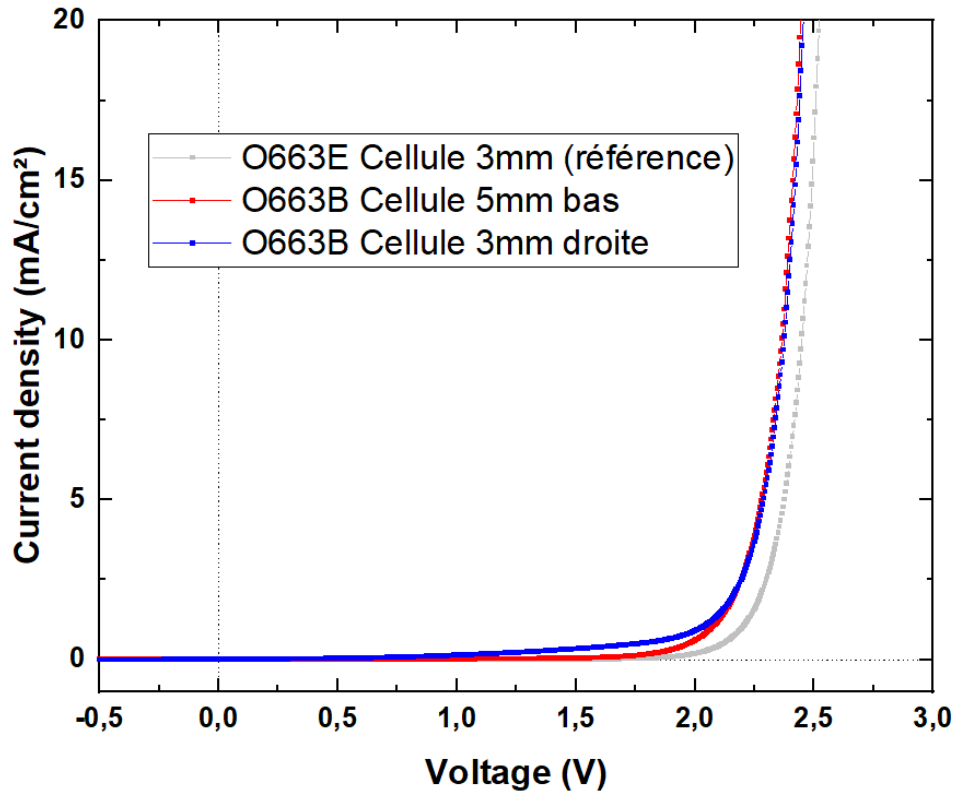


Figure 5-8 : Courbe $I(V)$ sous obscurité des deux cellules précédentes. La courbe grise est encore donnée comme référence. On constate l'absence de la déviation autour $V = 0,4 \text{ V}$

Ces cellules fonctionnelles, malgré leurs imperfections étaient quand même la preuve que le procédé est fonctionnel. Ainsi, on a atteint le dernier objectif du projet. La suite est donc de déterminer l'origine exacte de ces imperfections pour les corriger dans les échantillons suivants. Le procédé, quoique fonctionnel peut encore être optimisé. En effet, les échantillons dont on a parlé ici ne sont que les premiers fabriqués à l'aide de ce procédé. Nous allons voir dans la section suivante les investigations menées pour expliquer la déviation observée et la supprimer sur les futures cellules.

5.4) Identification des problèmes et corrections

5.4) a) Dégradation des cellules

Les cellules fonctionnelles de l'échantillon O663B ont d'abord été testées en électroluminescence afin de s'assurer que la déviation ne vient pas d'un défaut dans la sous-cellule supérieure. L'échantillon est polarisé en tension et jusqu'à ce qu'un courant

passe au travers de celui-ci (mesure comparable à un I-V en obscurité). Il s'agit ici d'utiliser la cellule comme une diode électroluminescente. La cellule mise sous tension émet de la lumière avec chacune de ses sous cellules. Seule la top cell peut être observée car elle couvre les autres. L'électroluminescence des deux cellules ne semble pas expliquer la déviation. Une photographie des cellules pendant la mesure est donnée en Figure 5-9(a) et (b) pour les cellules 3 mm et 5 mm respectivement. Aucun défaut n'était cependant observé.

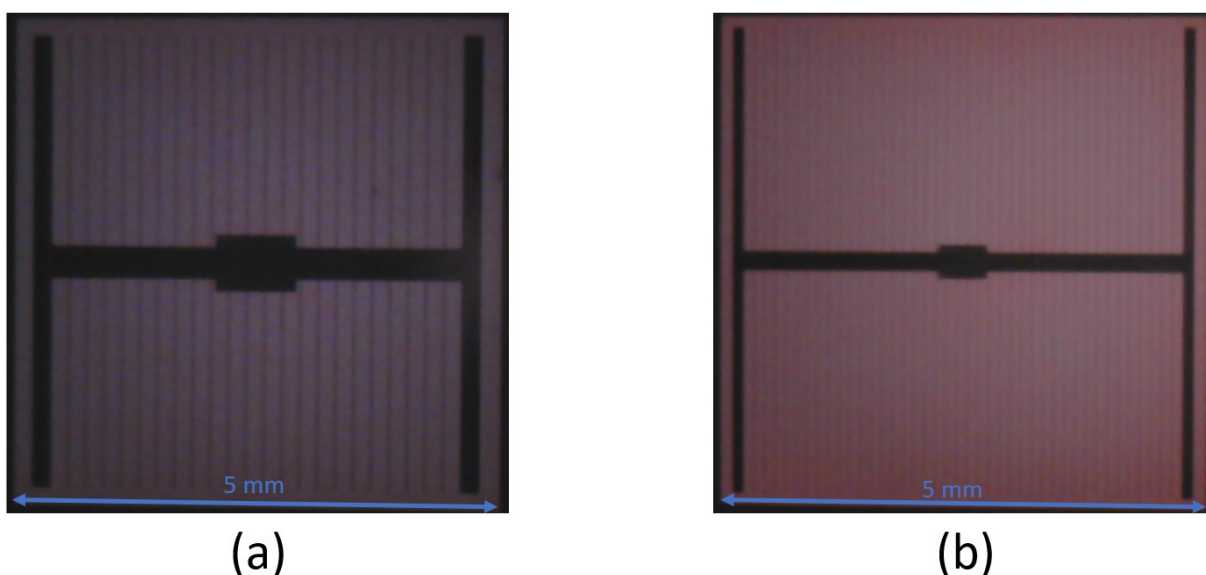


Figure 5-9 : Photographie de l'électroluminescence des deux cellules fabriquées. (a) Cellule 3mm (b) Cellule 5mm

Trois jours après avoir fait cette mesure on a voulu savoir comment la déviation se comportait en dessous de -0.5V (augmentation ou saturation). Malheureusement, en voulant faire cette mesure, nous avons constaté que les cellules étaient maintenant court-circuitées. L'apparition de ce court-circuit était surprenante, car elle apparaît 8 à 10 jours après la fin de la fabrication. L'isolation SU-8 a d'abord été mise en doute. On a également supposé que la pâte d'argent pourrait diffuser dans la SU-8, car on a affaire à deux matrices d'époxy en contact. Une vue en coupe est donnée en Figure 5-10(a) (la même que la Figure 4-22). Sur la Figure 5-10(b) on peut voir un zoom sur l'angle inférieur droit du via. Sur ces images, on n'observe pas de décollement entre la métallisation et la SU-8. L'hypothèse d'un court-circuit à cette interface est donc rejetée. On voit également sur ces vues en coupe que la pâte d'argent est un ensemble

de morceaux d'Ag (blancs) dans une matrice époxy (noire). Il semble peu probable que d'aussi gros morceaux d'Ag diffusent dans la SU-8. Des mesures EDX confirment l'absence d'Ag dans la SU-8. Ce court-circuit a donc été attribué à une évolution de la pâte de sérigraphie. Des bavures de celle-ci issues des motifs de tests couvraient la marche oxyde-Ge très loin du via. Ces bavures auraient pu évoluer et finir par former un contact (cf. Figure 5-5). Cette "évolution" est purement hypothétique et ses éventuels mécanismes ne sont pas connus. Néanmoins, à titre de précaution un nouveau pochoir de sérigraphie a été découpé. Dans celui-ci, les surfaces de métallisations sont grandement réduites pour contrer les débordements de la sérigraphie. Les motifs de test, dont les détails étaient trop fins pour la sérigraphie, ont été supprimés.

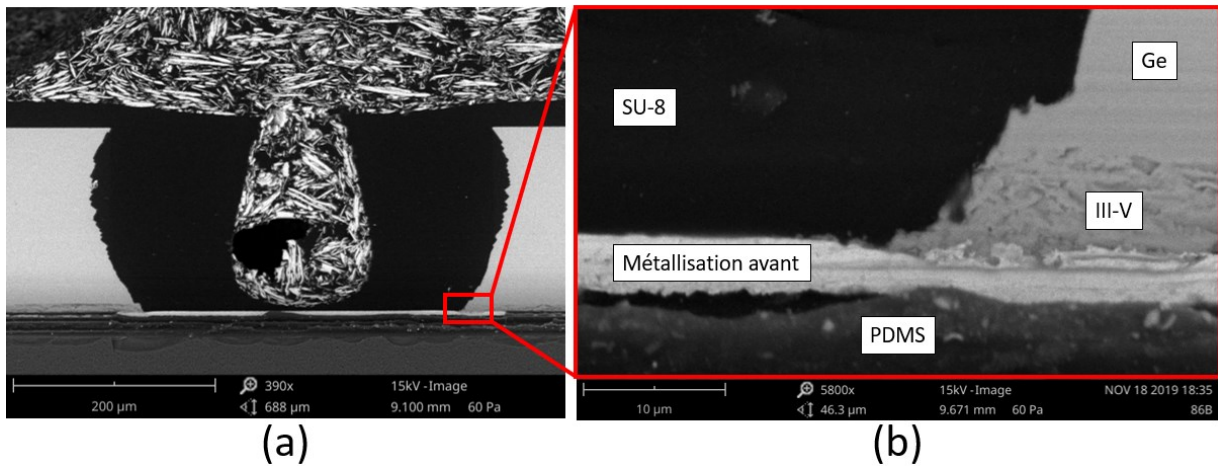


Figure 5-10 : Vue en coupe au MEB d'un via fonctionnel. (a) Vue complète (b) Zoom sur l'angle inférieur droit. On constate l'absence de décollements malgré les dégâts mécaniques infligés par la scie de découpe

Notons cependant que la dernière cellule fabriquée dans ce projet (O663A 1 cm) a été mesurée à nouveau 15 jours après sa fabrication. Elle était toujours fonctionnelle. Le dernier design utilisé pour le pochoir de sérigraphie permet à priori d'éliminer ce problème de court-circuit apparaissant peu après la fin de la fabrication. Il serait pertinent de refaire une mesure après un intervalle de temps plus significatif.

5.4) b) Identification de l'origine de la déviation

Revenons-en aux déviations observées dans les courbes des 2 premières cellules fonctionnelles (cf. Figure 5-7). Plusieurs sources sont possibles pour cette déviation.

Le wafer utilisé pourrait avoir un défaut qui rendrait impossible la fabrication de cellule de bonne qualité. On pourrait aussi supposer que le spectre de la lampe utilisée modifie les caractéristiques, car il manque un filtre pour atteindre le spectre de référence. Finalement cette déviation pourrait être présente dès la gravure plasma.

La première étape a été de savoir si le défaut pouvait venir du wafer lui-même, car l'épithaxie portait beaucoup de petits défauts (moins de 3 μm de diamètre). Pour résoudre cette interrogation, les échantillons du lot suivant ont pu être mesurés sous 1 - soleil avant le collage PDMS et la gravure du via. Cette mesure est prévue dans le procédé tel qu'il est présenté dans ce mémoire, mais n'avait pas pu être faite sur les échantillons du premier lot. On les mesure donc à l'étape 10 du procédé (cf. Annexe B). La Figure 5-11 donne un exemple d'une courbe mesurée lors de ce test. On observe que la caractéristique est celle d'une cellule normale et performante. Le V_{OC} de 2,47 V est satisfaisant (ce qui confirme qu'on a eu une perte de V_{OC} sur l'échantillon O663B) et le J_{SC} de 10,51 mA/cm^2 ainsi que le FF de 88,8% sont très bons considérant que les cellules n'ont pas d'ARC. Toutes les cellules des échantillons de ce lot ont des performances proches et aucune n'affiche la déviation observée sur les deux cellules à contact face arrière mesurées. Cela confirme que le wafer, malgré ses défauts d'épithaxies permet de fabriquer de bonnes cellules et que la déviation observée ne peut lui être attribué.

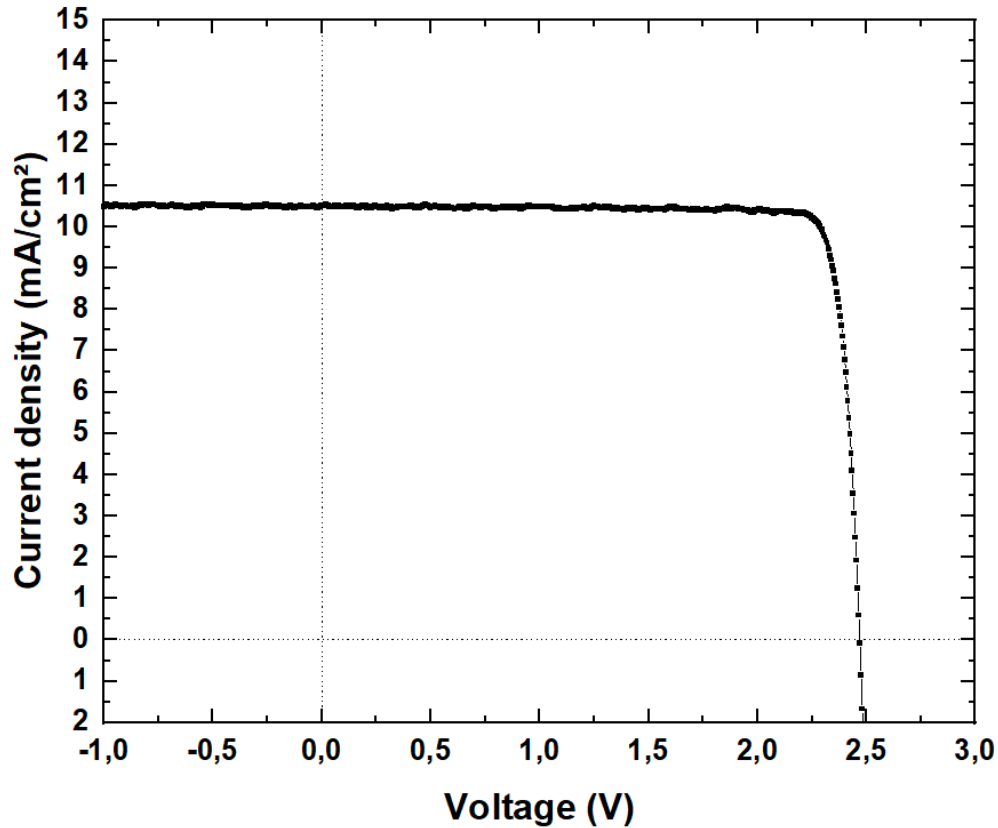


Figure 5-11 : Caractéristique $I(V)$ d'une cellule du deuxième lot avant collage. La courbe est conforme aux attentes et on en conclue que la déviation ne vient pas du wafer.

La déviation est donc causée soit par une étape du procédé soit par la station 1-soleil utilisée pour les mesures de cellules à contact face arrière. Cela semble peu probable, car la cellule utilisée pour calibrer l'intensité de la lampe ne présente pas cette déviation (la cellule de calibration est aussi III-V/Ge). Toutefois, une mesure I-V a été effectuée sur l'une des cellules du deuxième lot. Les contacts étaient pris comme pour une cellule classique, mais l'illumination venait du montage 1-soleil alternatif (cf. Figure 5-3: le montage a été modifié par rotation du miroir de sortie afin d'éclairer vers le bas). Il a alors suffi de comparer la courbe de la cellule à celle obtenue dans la station 1-soleil classique. Les deux courbes sont présentées en Figure 5-12 et sont semblables, on peut donc conclure que le défaut provient de l'échantillon O663B lui-même. La différence de J_{SC} vient probablement d'une mauvaise calibration de la lampe. Le spectre de la lampe ne peut donc pas être remis en question.

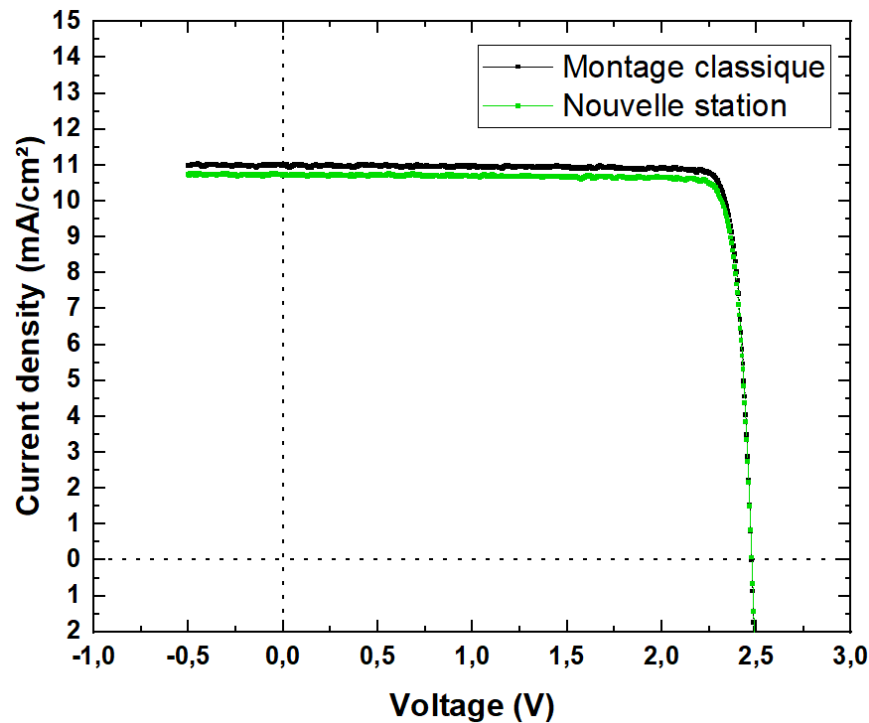


Figure 5-12 : Deux caractéristiques $I(V)$ sous illumination d'une même cellule. En noire la cellule est mesurée sur le montage standard. En vert, l'illumination provient du montage modifié utilisé pour les cellules à contact face arrière.

Le wafer et la station ne peuvent donc pas être mis en cause, et l'isolation est à priori fonctionnelle. Un autre facteur suspect serait la gravure plasma du via. Pour vérifier l'influence de cette étape, les deux derniers échantillons du lot initial ont été utilisés (O663A&V). Comme ces défauts n'apparaissent pas sur les courbes d'obscurité, on aurait pu manquer ces défauts lors des tests précédents (mesures en fond de via). Des mesures en fond de vias ont alors été faites sous illumination dans les structures de tests (chaînes de via). Celles-ci ont révélé non seulement que la déviation est présente avant l'isolation SU-8 et la sérigraphie, mais que cette déviation peut varier d'une cellule à l'autre. On s'intéresse ici à la forme des courbes plus qu'à leurs valeurs exactes peu représentatives des cellules finales. Certaines mesures donnent des courbes I-V caractéristiques d'une cellule parfaitement fonctionnelle (avec toutefois un V_{OC} bas) (Figure 5-13(a)). D'autres donnent la même déviation, qui apparaît à des valeurs de tension différentes et dont la pente peut varier (Figure 5-13(b) et (c)). Finalement, certains couples de vias présentent la même déviation, mais le courant atteint une saturation (Figure 5-13(d)).

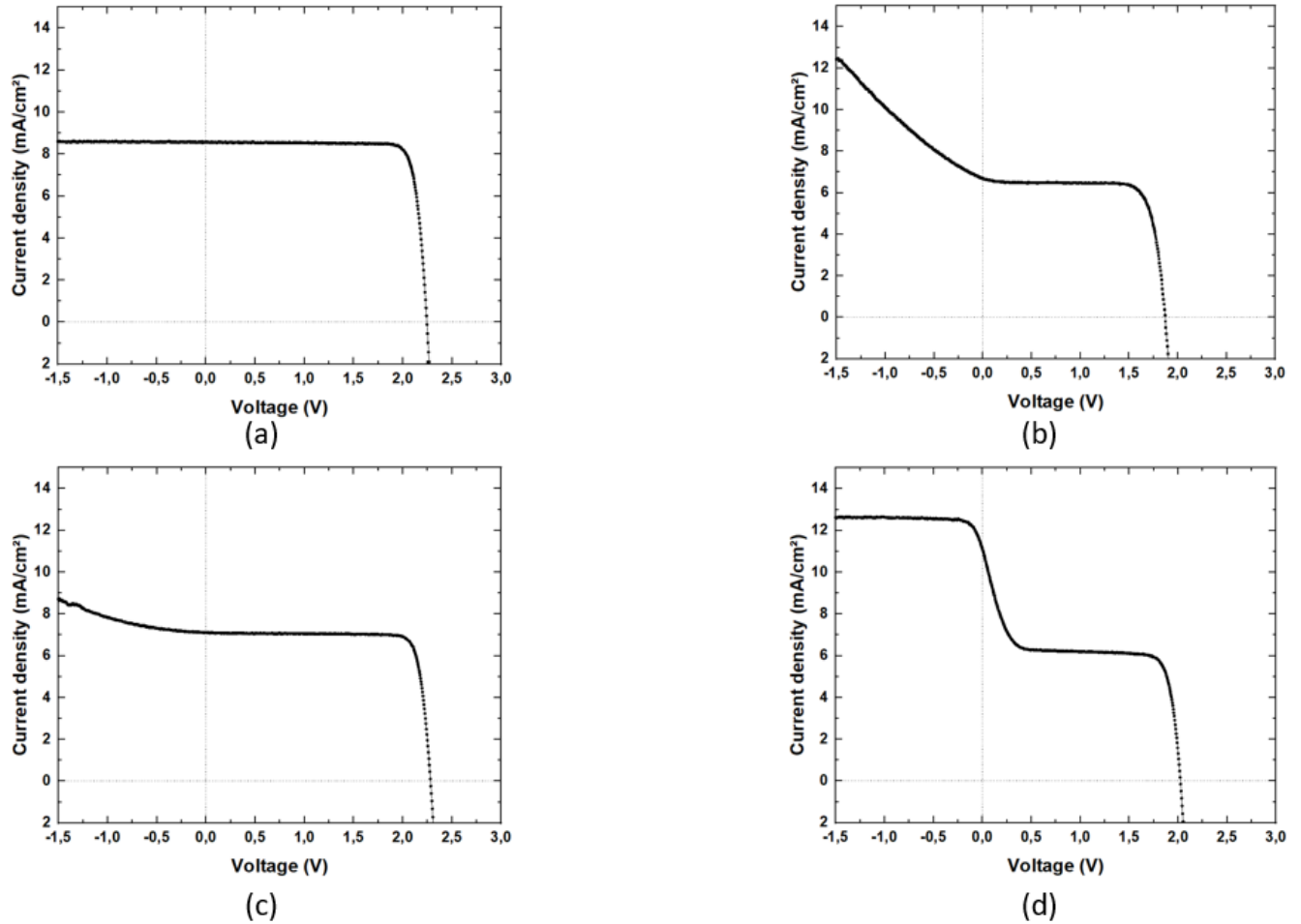


Figure 5-13 : Courbes obtenues sous illumination en faisant des mesures en fond de via immédiatement après la gravure plasma. (a) La cellule présente une caractéristique normale. (b) La cellule présente une déviation comparable à celle observée sur les deux premières cellules fonctionnelles (c) La cellule présente un shunt semblable dont la pente est bien plus faible. (d) La cellule présente le même shunt, mais le courant atteint une saturation.

La conclusion immédiate que l'on peut tirer de ces mesures, est que ce problème apparaît dès la gravure plasma du via. À partir de cette information et sachant qu'on pense que la déviation est due à un shunt partiel d'une ou plusieurs sous-cellules, on peut penser à un matériau pulvérisé par le bombardement ionique sur les flancs du via. Une vue schématique des principales espèces présentes en fond de via est donnée en Figure 5-14. Premièrement, on peut supposer qu'à la fin de la gravure, la surgravure de sécurité appliquée pour s'assurer de la disparition de toute trace de III-V, a permis la pulvérisation du Ni de la membrane métallique. Sous l'effet du bombardement ionique, le métal aurait pu être pulvérisé et se serait redéposé sur les flancs des sous-cellules fournissant un passage pour les fuites de courant. Deuxièmement, dans notre cas, on

finit par la gravure de la top cell. Celle-ci contient de l'In qui, comme nous l'avons vu dans la section 2.2) a) i. , ne forme pas de sous-produits volatils aux températures considérées. Il est donc uniquement ôté par pulvérisation. Ces atomes pulvérisés pourraient s'accumuler sur les sous-cellules adjacentes. On s'attendrait alors à ce que les sous-cellules de Ge et de Ga(In)As soient responsables du shunt observé.

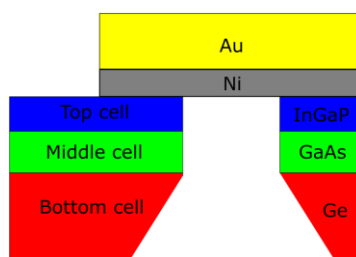


Figure 5-14 : Schéma simplifié des espèces présentes en fond de via (vue en coupe)

La déviation observée sur les deux premières cellules fonctionnelles apparaît durant la gravure plasma. On peut supposer qu'elle est due à une espèce pulvérisée sur les flancs du via, à priori de l'In ou du Ni. Nous allons maintenant essayer de nous en débarrasser sur les deux derniers échantillons (qui ont été mis en pause après la gravure du via).

5.4) c) Correction de la déviation

Nous avons supposé que la déviation était due à la pulvérisation d'espèce sur les flancs du via pendant sa gravure. Pour vérifier cette hypothèse, il a été décidé de graver les sous-cellules sélectivement une à une. On avait effectivement mentionné en 2.2) a) ii. que l'on pouvait le faire par voie humide. Premièrement le H_2O_2 grave uniquement le Ge et oxyde les autres couches et le Ni. Le mécanisme de gravure, consiste à oxyder le Ge et former GeO_2 , un composé soluble dans l'eau[68]. Seul le Ge est gravé, et à un taux très faible ($\sim 17nm/min$). Il est donc décidé d'utiliser ce bain peu agressif en premier. L'échantillon O663V est immergé pendant 15 minutes et aucune différence visible n'est observée. L'échantillon O663A suit le même procédé, puis l'on fait de nouveau des mesures I-V 1-soleil en fond de via. Les allures des courbes obtenues (données en Figure 5-15) sont comparables aux courbes obtenues juste avant cette opération. Certaines structures ont malheureusement été détruites par l'insertion de la

pointe de mesure et il n'est donc pas possible de comparer à l'état de référence pour la plupart des courbes. On s'intéresse donc ici surtout à savoir si les déviations sont corrigées. On note cependant une dégradation importante du V_{OC} de certaines courbes (dans Figure 5-15 la courbe noire par exemple) qui est attribuée à la présence d'oxyde de GaAs sur la middle cell. En effet, on avait discuté en 2.2) b) l'effet délétère de cet oxyde sur les performances des cellules.

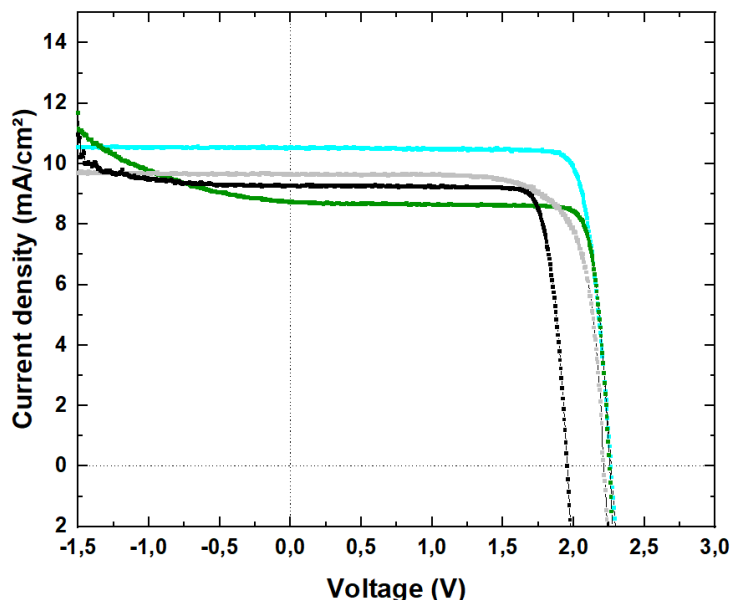


Figure 5-15 : Graphique reprenant 4 caractéristiques $I(V)$ sous illumination de motifs de contrôle de l'échantillon O663A après un bain de 15 minutes de H_2O_2 . On constate peu de différence si ce n'est une perte de V_{oc} importante sur la courbe noire

On poursuit donc par une gravure de la middle cell. Deux solutions de gravures s'offrent à nous (cf: 2.2) a) ii.). La solution $NH_4OH:H_2O_2:H_2O$ à 9:9:240 a été utilisée. Cette solution est utilisée pour la gravure de la couche contact (faite de GaAs) et grave aussi la middle cell sans impact sur la métallisation avant.

Une immersion de 1 min de l'échantillon O663V n'a pas donné de résultats observables. Le même traitement a été appliqué à l'échantillon O663A et les mesure I-V 1-soleil en fond de via ont été refaites. Trois d'entre elles sont reportées sur la Figure 5-16. Les courbes gardent encore le même aspect que précédemment et celles qui s'étaient dégradées après le bain H_2O_2 sont rétablies à leurs valeurs initiales. Cela

renforce l'hypothèse que cette dégradation était due à l'oxyde de GaAs formé. Celui-ci aura été gravé par le bain de gravure de la couche contact.

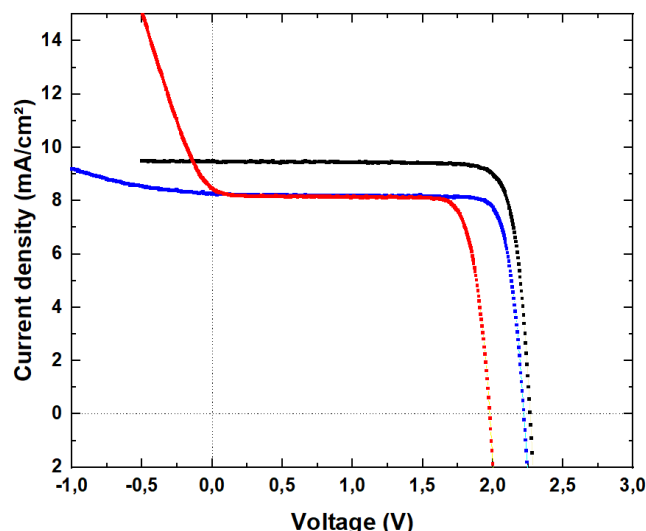


Figure 5-16 : Caractéristiques $I(V)$ sous illumination obtenues en fond de via sur l'échantillon O663A après gravure de 1 min de la middle cell.

Cependant, la déviation n'est toujours pas corrigée. Une gravure de la top-cell a donc été faite à l'aide de la solution $\text{HCl}:\text{H}_3\text{PO}_4$ 1:1. L'échantillon O663V a subi cette gravure en premier. Comme on pouvait l'attendre cette gravure a supprimé tout le Ni exposé. Les dégâts étant visibles, l'échantillon O663A n'a pas subi ce bain et l'échantillon O663V a été mesuré. Toutes les mesures indiquent que l'on a détruit les cellules, car on a maintenant des résistances (il y aurait un court-circuit). Il est difficile de dire ce qui s'est passé exactement (le temps manquait pour investiguer en détail).

L'échantillon O663A, qui n'avait subi que H_2O_2 et la gravure de couche contact, a subi un bain de 25s dans du BOE pour se débarrasser de tous les oxydes formés par les traitements successifs (H_2O_2 notamment). Le temps a été choisi afin de ne pas garder un reste d'oxyde protecteur sur la métallisation de base. L'isolation SU-8 a alors été faite, suivie de la sérigraphie. Cet échantillon a donné des résultats mitigés. Deux cellules (5mm) portaient des bulles dans la SU-8 et ont par conséquent été court-circuitées. Les deux cellules de 3mm formaient chacune un circuit ouvert. Ce résultat décevant était néanmoins prévisible, car on a pu observer sur les coupes de via qu'il peut rester des vides dans la pâte de sérigraphie (cf Figure 5-10). La pâte d'argent

contiendrait donc une fracture qui brise la continuité électrique. Finalement, la cellule 1 cm est fonctionnelle. Sa caractéristique est donnée en Figure 5-17 en noir. On voit que son V_{OC} est comparable aux deux autres cellules fonctionnelles mesurées. En revanche, on constate un shunt important au travers des 3 jonctions menant à un plateau en pente. Les traitements humides subis par la cellule n'ont donc pas permis de la "réparer". Il reste donc du travail à effectuer sur la gravure III-V du via.

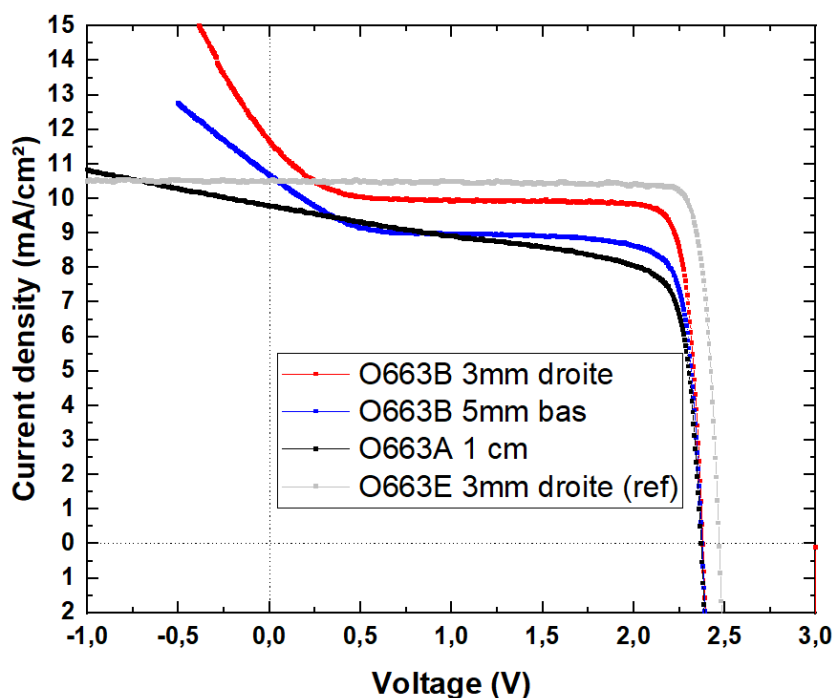


Figure 5-17 : Graphique reprenant les caractéristiques $I(V)$ sous illumination des 3 cellules fonctionnelles mesurées. En noir on voit la caractéristique de la dernière cellule fabriquée qui présente un shunt franc.

Dans cette section on a pu déterminer que le shunt observé sur les cellules apparaît pendant la gravure plasma du via. Deux explications sont proposées, et une autre cellule fonctionnelle a aussi été fabriquée. Celle-ci est aussi shuntée, mais elle est une preuve que le procédé est fonctionnel sur plusieurs échantillons. Son fonctionnement après 15 jours est une première preuve que le problème d'évolution dans le temps est réglé.

Dans cette partie, on a pu confirmer que le procédé permet la fabrication de cellules triple jonctions InGaP/(In)GaAs/Ge à contact face arrière ce qui est une première mondiale. La cellule présente des paramètres intéressants avec un V_{OC} de

2,38 V et un J_{SC} d'environ 9,9 mA/cm² (valeur au plateau). Une déviation autour de 0 V témoigne d'un shunt sur l'une des jonctions. Des optimisations restent à faire pour rendre les cellules plus performantes, mais les étapes en cause sont identifiées et une explication est proposée (la gravure plasma cause la déviation). Les cellules présentées ici ont des caractéristiques proches de celle d'une cellule standard sur la même structure. Cette partie permet donc de clore ce mémoire, car tous les objectifs décrits en introduction ont été atteints. Il est maintenant temps de conclure et de dégager les perspectives pour la suite de ce travail.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans ce mémoire, nous avons vu comment des cellules triple jonction InGaP/(In)GaAs/Ge à contact face arrière fonctionnelles peuvent être fabriquées. Au meilleur de nos connaissances, ceci est une première mondiale. Cette nouvelle architecture ouvre la voie à des cellules et des modules Dense Receiver Array plus efficaces pour le photovoltaïque concentré. Elles devraient aussi permettre une baisse des coûts d'assemblage en éliminant les connexions par wire bonding, et donc en rendant ces cellules compatibles avec les techniques d'assemblage de la microélectronique. Cette baisse de coûts est valable pour tous les types de modules.

L'objectif de ce projet de maîtrise était de répondre à la question « **Comment intégrer un renvoi du contact émetteur en face arrière au processus de fabrication des cellules triple jonction?** »

Pour ce faire, le projet a été divisé en 4 objectifs intermédiaires:

- Proposer un procédé de fabrication
- Développer ce procédé afin qu'il soit opérationnel
- Fabriquer des cellules en suivant ce procédé
- Mesurer ces cellules pour prouver leur bon fonctionnement

Le développement du procédé de fabrication a nécessité de multiples d'itération, en commençant par les étapes de fabrication de la face arrière propres à la volonté de renvoyer le contact en face arrière.

Le procédé final consiste donc à réaliser la microfabrication d'une face avant de cellule classique, puis à ouvrir un via à travers la cellule depuis la face arrière. L'objectif est d'ouvrir un passage pour que les électrons générés en face avant puissent se rendre en face arrière.

Ce via est gravé à l'aide de deux plasmas successifs par la face arrière (chimie SF₆ pour Ge puis SiCl₄/Cl₂/H₂ pour les III-V). Les flancs de ce via sont ensuite isolés

grâce à un diélectrique photosensible (SU-8). Un motif lui est appliqué par photolithographie. Le via isolé par la SU-8 est alors métallisé par sérigraphie. Les charges générées en face avant peuvent alors circuler vers l'électrode de face arrière sans fuiter dans le substrat.

Ce procédé nous a permis de fabriquer 3 cellules fonctionnelles et mesurables. Celles-ci ont été caractérisées et présentent un comportement proche de la référence. Cependant leur V_{OC} faible (2,38 V contre 2.5 V espérés) et la présence d'une fuite de courant dans une sous cellule indiquent qu'elles peuvent être améliorées. Des tests ont permis d'affirmer que ce shunt apparaît dès la gravure plasma du via. Il restera donc à trouver un moyen de l'éliminer.

Le cahier des charges demandait également que les résultats obtenus soient reproductibles et si possible industrialisables. Nous avons fourni une preuve de concept, et le procédé pourrait encore beaucoup évoluer si l'on change l'isolation électrique et le profil du via. Si le transfert vers l'industrie de ce procédé n'est pas encore prêt, les techniques choisies en revanche, sont toutes des techniques utilisées en industrie. Il convient donc d'abord de s'assurer d'avoir un procédé mature donnant des cellules performantes et stables dans le temps avant de démarrer un transfert vers l'industrie. En revanche, le résultat est reproductible, car dès le premier lot fabriqué, 3 cellules fonctionnelles ont été fabriquées, mesurées et présentent des caractéristiques similaires. Des cellules fonctionnelles ou partiellement fonctionnelles ont été obtenues sur 3 échantillons parmi les 4 achevés.

L'ensemble des résultats attendus pour ce projet de maîtrise a donc été atteint et nous allons maintenant nous intéresser aux meilleures façons de poursuivre ces travaux.

Pour aller plus loin, il convient d'abord d'identifier le problème causé par la gravure plasma qui résulte en un shunt. Cette amélioration porte donc sur la gravure des III-V dans le via. Il convient d'identifier l'espèce pulvérisée sur les flancs et de trouver un moyen de s'en débarrasser. Comme nous l'avons vu, des progrès peuvent

aussi être faits sur la gravure Ge. Il serait préférable d'avoir un profil plus évasé simplifiant l'isolation ainsi qu'une surface moins rugueuse afin d'améliorer le V_{OC} des cellules fabriquées. Pour atteindre un tel profil, on pourrait par exemple s'inspirer des travaux de **Faissal El Hamidi** et utiliser une gravure en deux temps pour le Ge. On commence avec le masque de résine puis on le retire avant de finir la gravure. La deuxième gravure sans masque permet de supprimer les angles à la surface du Ge. Comme nous l'avons vu dans l'état de l'art avec l'article de **Shim et al.**[29], il est possible de contrôler la rugosité des flancs même si ces développements n'ont pas été faits. Si le lissage des flancs ne suffit pas, il faudra travailler à la passivation électrique des flancs du via.

Lorsque ces améliorations auront été faites et que les courbes $I(V)$ des cellules conformes à la référence seront obtenues, certaines métallisations pourraient être optimisées. La métallisation de base a des motifs tellement larges que l'on pourrait vouloir utiliser un "shadow mask" pour appliquer les motifs. Cela nous permettrait de nous affranchir du soulèvement. On pourrait alors déposer le contact de base juste après la gravure plasma. On se débarrasserait ainsi des problèmes posés par celle-ci durant la gravure, on n'aurait pas à la protéger et on n'aurait plus besoin de l'oxyde de protection. Une amélioration de la sérigraphie pour plus de précision et de reproductibilité serait aussi souhaitable. En effet, si l'on n'est pas capables de maintenir la pâte d'argent sur la SU-8 et que l'on se débarrasse de l'oxyde de protection, le court-circuit est assuré. Une nouvelle méthode d'application plus précise serait donc nécessaire. L'usage d'une pâte dédiée à la sérigraphie serait aussi préférable en termes de durabilité.

La résine SU-8 qui a été utilisée pour l'isolation électrique pourrait aussi poser des problèmes de durabilité de la cellule. La résistance de celle-ci à un usage en concentration n'a pas été faite, mais il serait pertinent de la tester dans un module par exemple. La littérature tend à penser la résine pourrait évoluer avec le cyclage en température impliqué par l'échauffement sous concentration[69]–[71]. Cependant ces articles citent plutôt l'humidité comme facteur principal de l'évolution. Par ailleurs les procédés considérés ici n'incluent pas de Hard bake, étape qui devait augmenter cette

la résistance à l'humidité et à la température. Si la SU-8 ne peut résister pour une durée suffisante (20 à 30 ans), il faudra user d'une méthode d'isolations plus conventionnelle comme d'une couche d'oxyde par exemple. La SU-8 est utilisée ici, car elle devait aider à atteindre rapidement une preuve de concept. Celle-ci pose néanmoins des problèmes et on voudrait atteindre une solution plus robuste.

En dehors des considérations de microfabrication, les prochaines étapes seraient de proposer un PCB capable d'accueillir la cellule. On pourrait ainsi la tester sous concentration dans le flash-tester ou encore évaluer son Efficacité Quantique Externe (EQE). L'EQE notamment aiderait à trouver la sous-cellule à l'origine du shunt observé.

Il conviendrait ensuite de l'assembler dans un module expérimental pour prouver que son assemblage est moins complexe comme nous l'affirmons depuis le début de ce document. Le collage de quartz devrait garantir la possibilité d'utiliser des outils industriels comme le "pick and place". En revanche, la découpe des cellules pourrait se révéler complexe. On pourrait cependant envisager de singular les cellules en même temps que la gravure des vias en modifiant le motif. Ainsi on économiserait les coûts liés à l'étape de singulation.

La preuve de concept présentée ici ouvre des nombreuses pistes pour continuer la recherche. On pourrait ainsi prouver l'efficacité de cette solution dans un contexte qui correspond mieux à la réalité de l'industrie CPV.

ANNEXES

A. Jeu de masque Hawaii utilisé

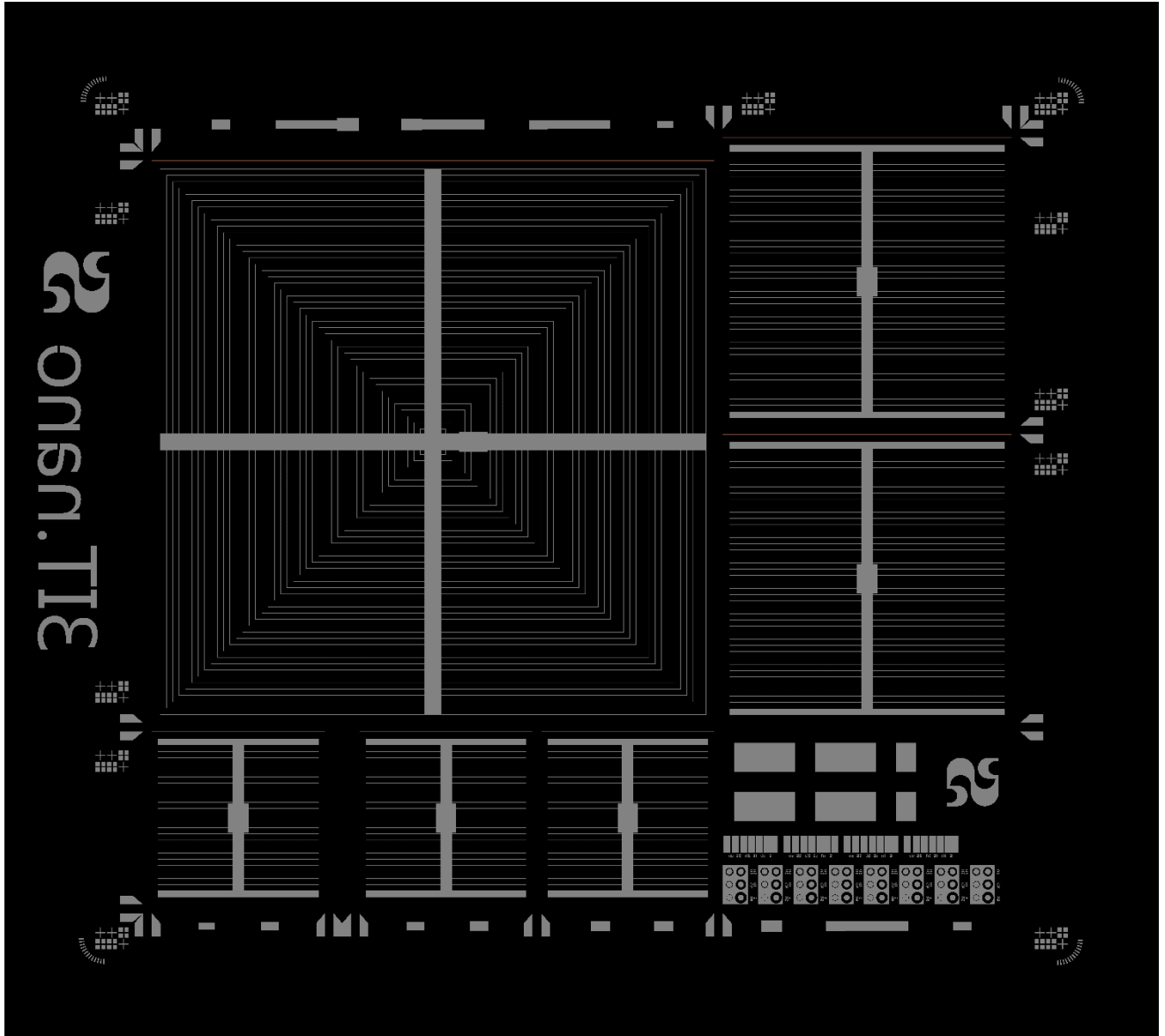


Figure 0-1 : Masque Hawaii, niveau Thick Metal (TM) Il s'agit de la métallisation avant, les zones grises reçoivent le dépôt.

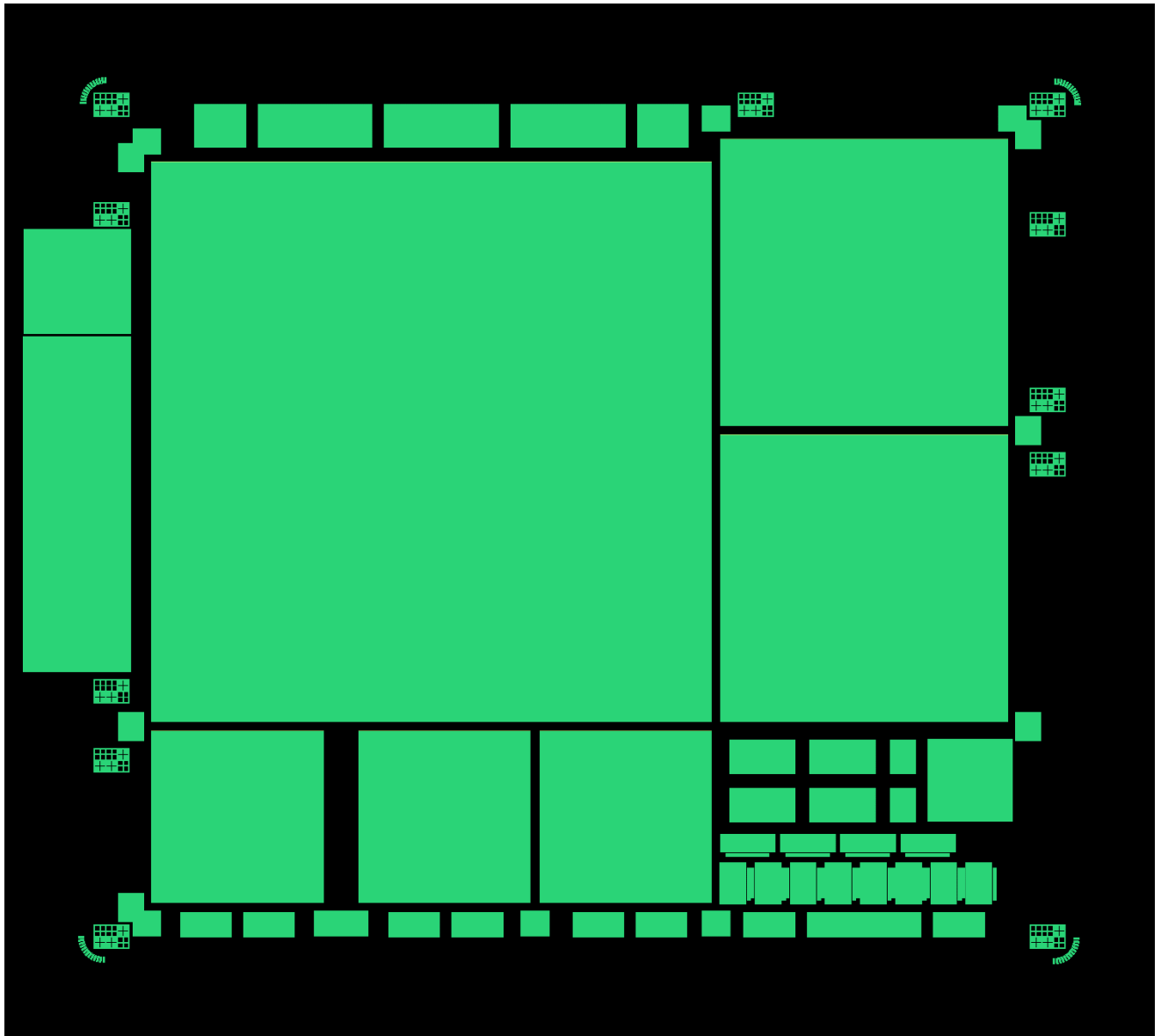


Figure 0-2 : Masque Hawaii, niveau Mésa (MS) Les zones en noir vont être gravées

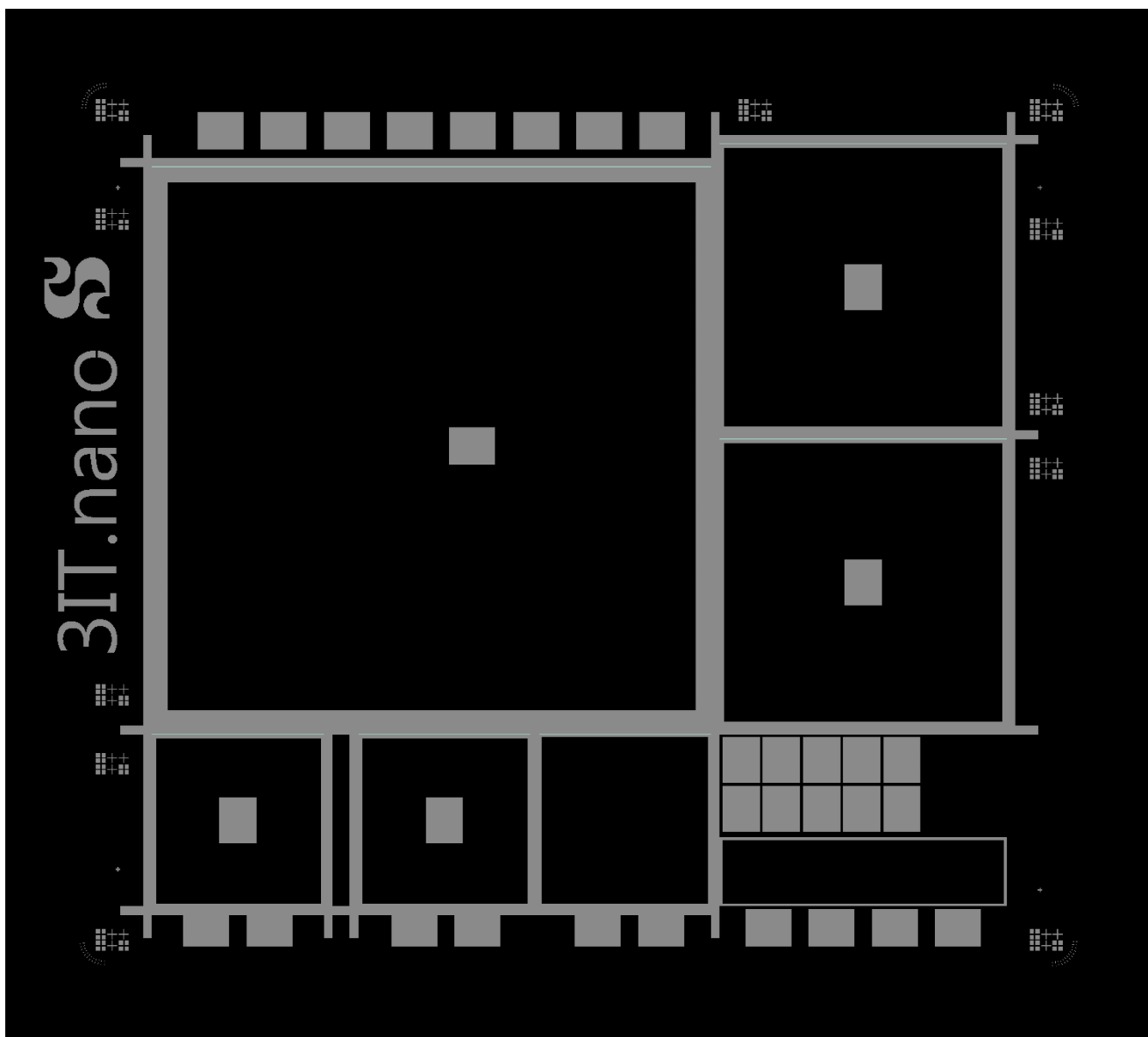


Figure 0-3 : Masque Hawaii, niveau Base Metal (BM) Il s'agit de la métallisation arrière. Les zones grises reçoivent le métal

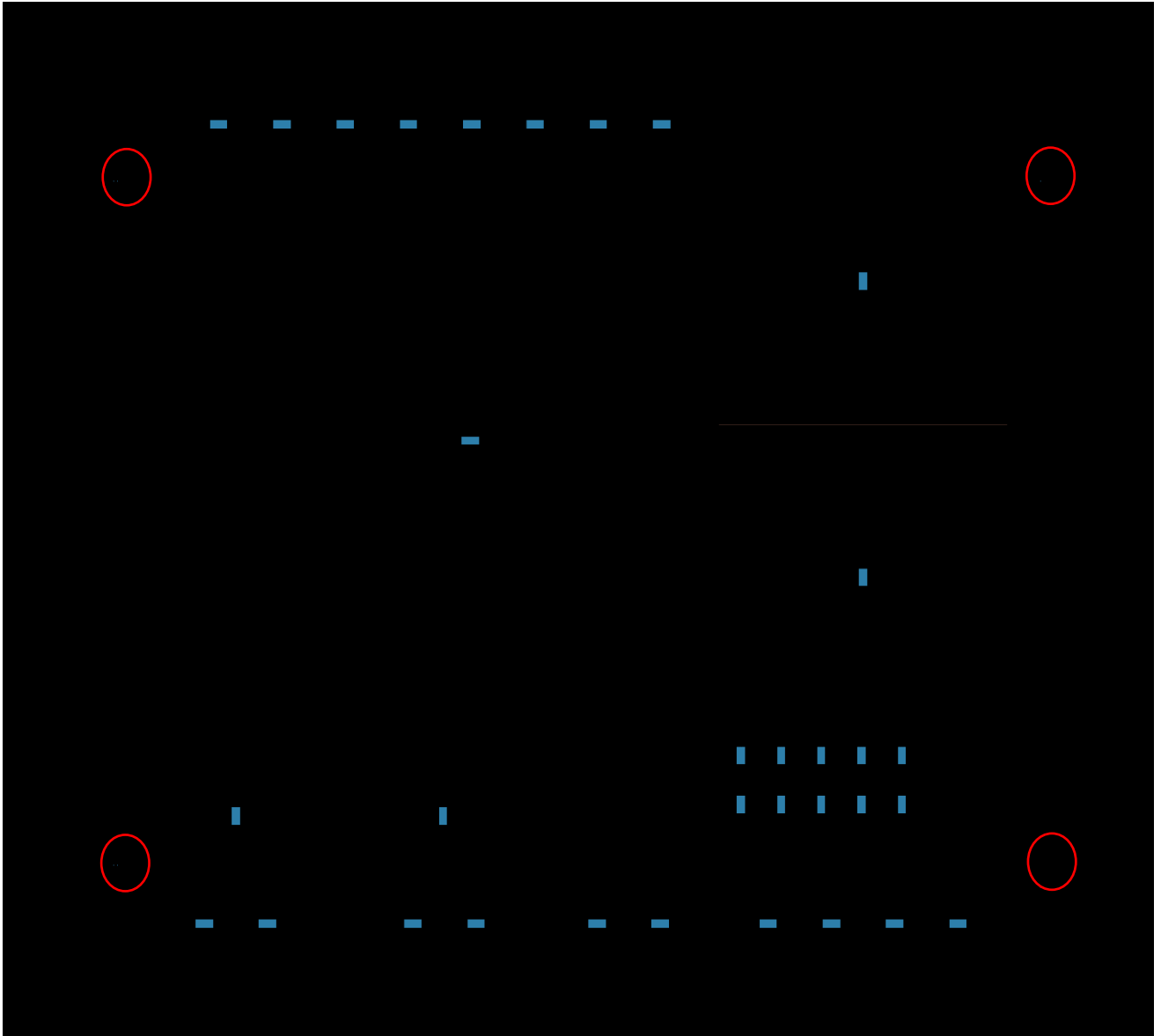


Figure 0-4 : Masque Hawaii, niveau Via Opening (VO) Les zones en bleu vont être gravées. Les marques d'alignement dédiées sont trop petites pour être vues ici. Leurs positions sont indiquées par les cercles rouges.

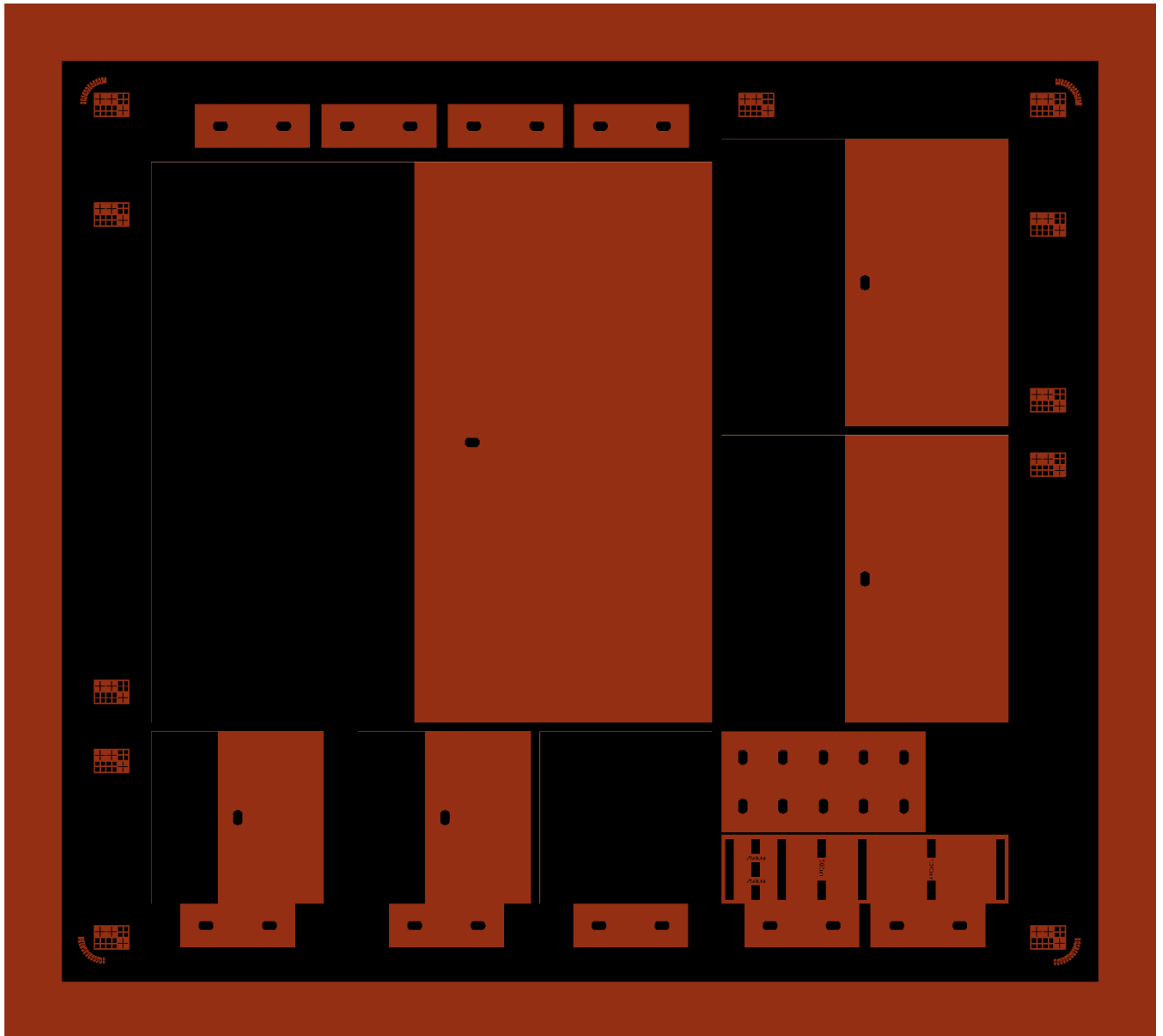


Figure 0-5 : Masque Hawaii, niveau Dielectric Insulation (DI) Les plaques de SU-8 apparaissent en rouge.

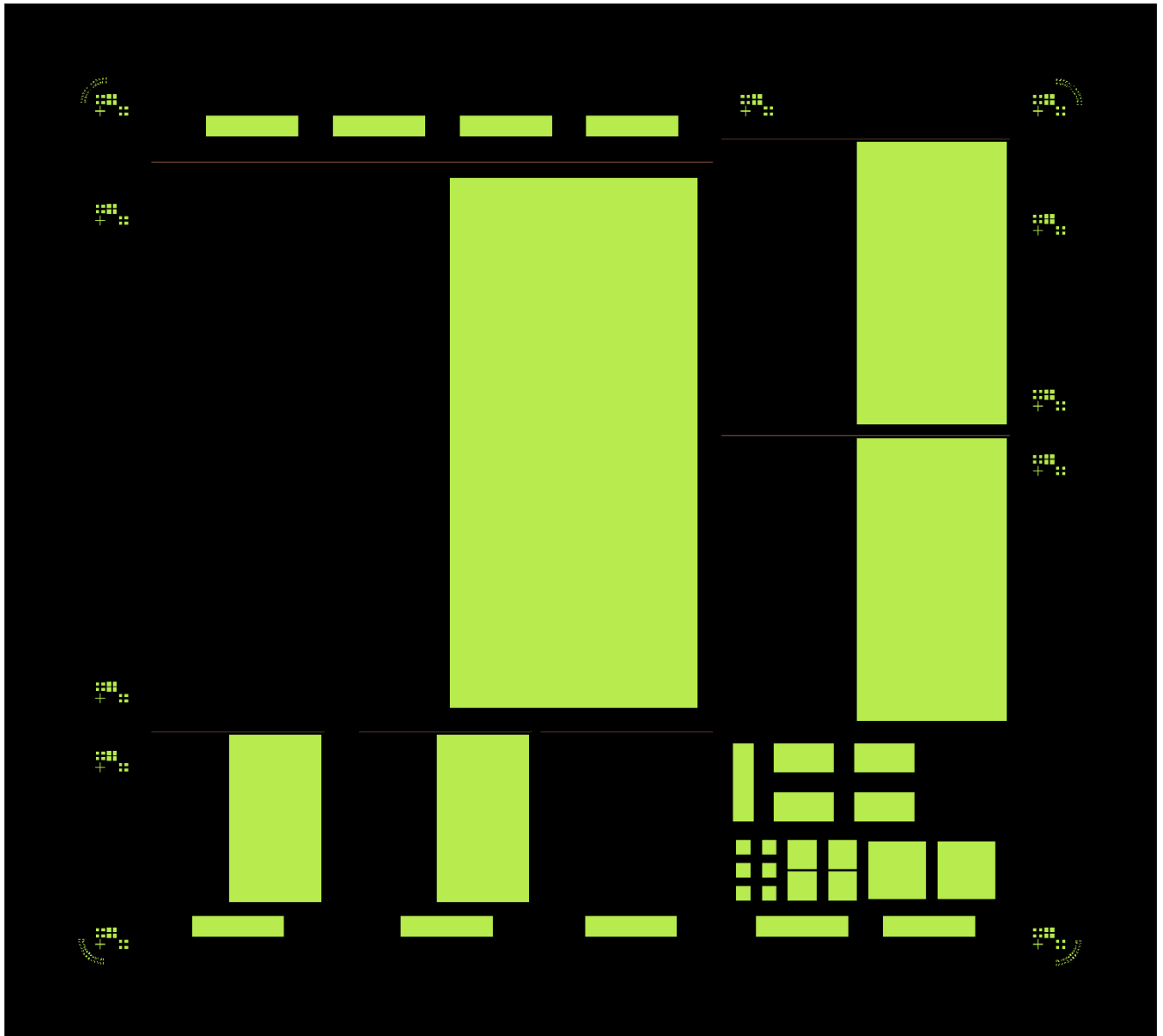


Figure 0-6 : Masque Hawaii, niveau Back Electrode Metal (BEM) Niveau initialement destiné à la métallisation de l'électrode émetteur en face arrière. Ce niveau a servi de base pour le design du pochoir de sérigraphie



Figure 0-7 : Motifs finaux adoptés pour le pochoir de sérigraphie. Chaque rectangle est une ouverture qui peut recevoir la pâte d'argent. Les motifs de contrôles, trop fins ont été supprimés. Les électrodes des cellules ont vu leur surface très réduite par rapport au niveau BEM pour éviter de faire dépasser les bavures.

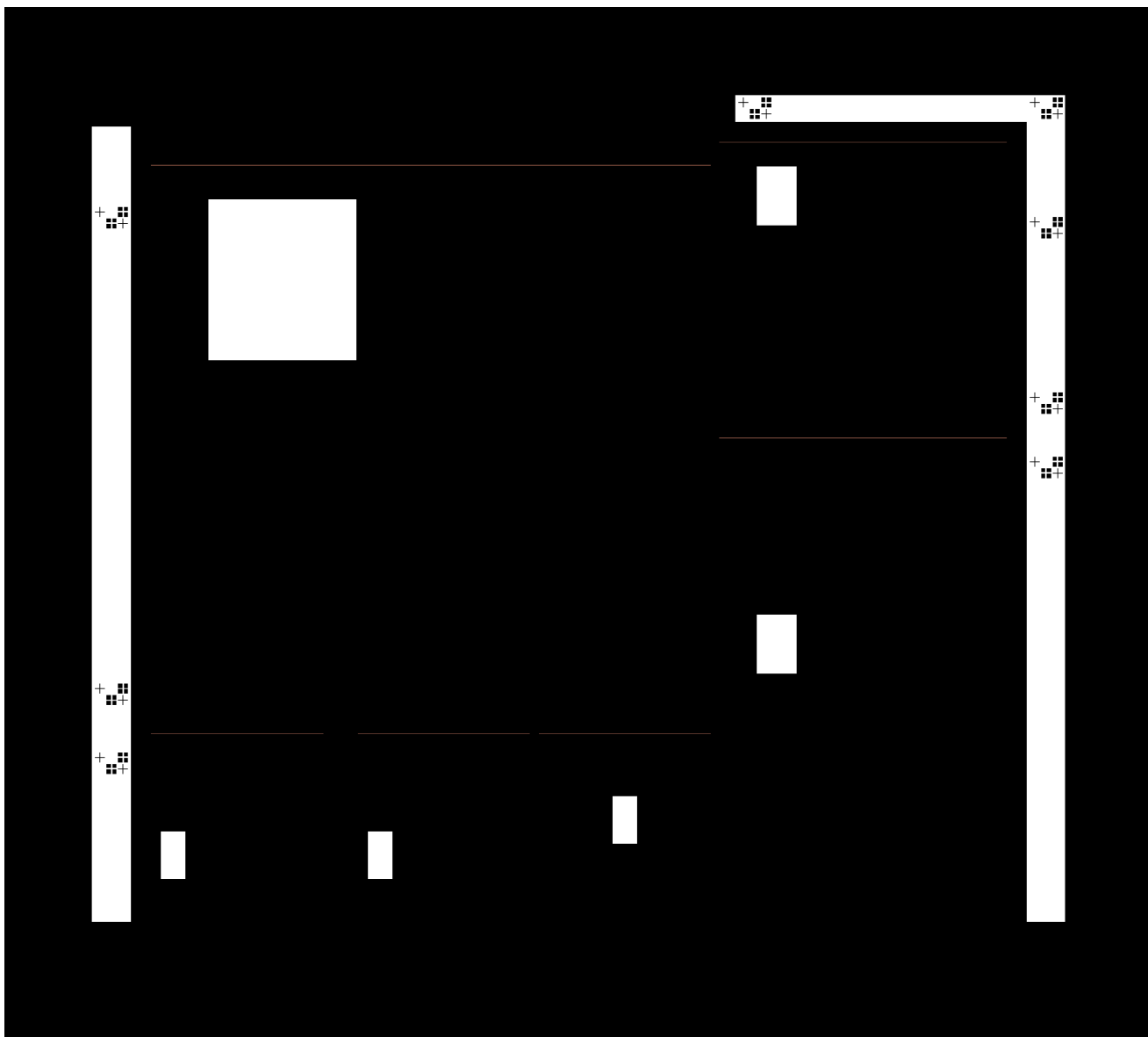


Figure 0-8: Masque Hawaii, niveau Base Opening (BO). Les zones en blanc sont gravées. Le rectangle extérieur est présent pour plus de facilité d'alignement.

B. Procédé détaillé

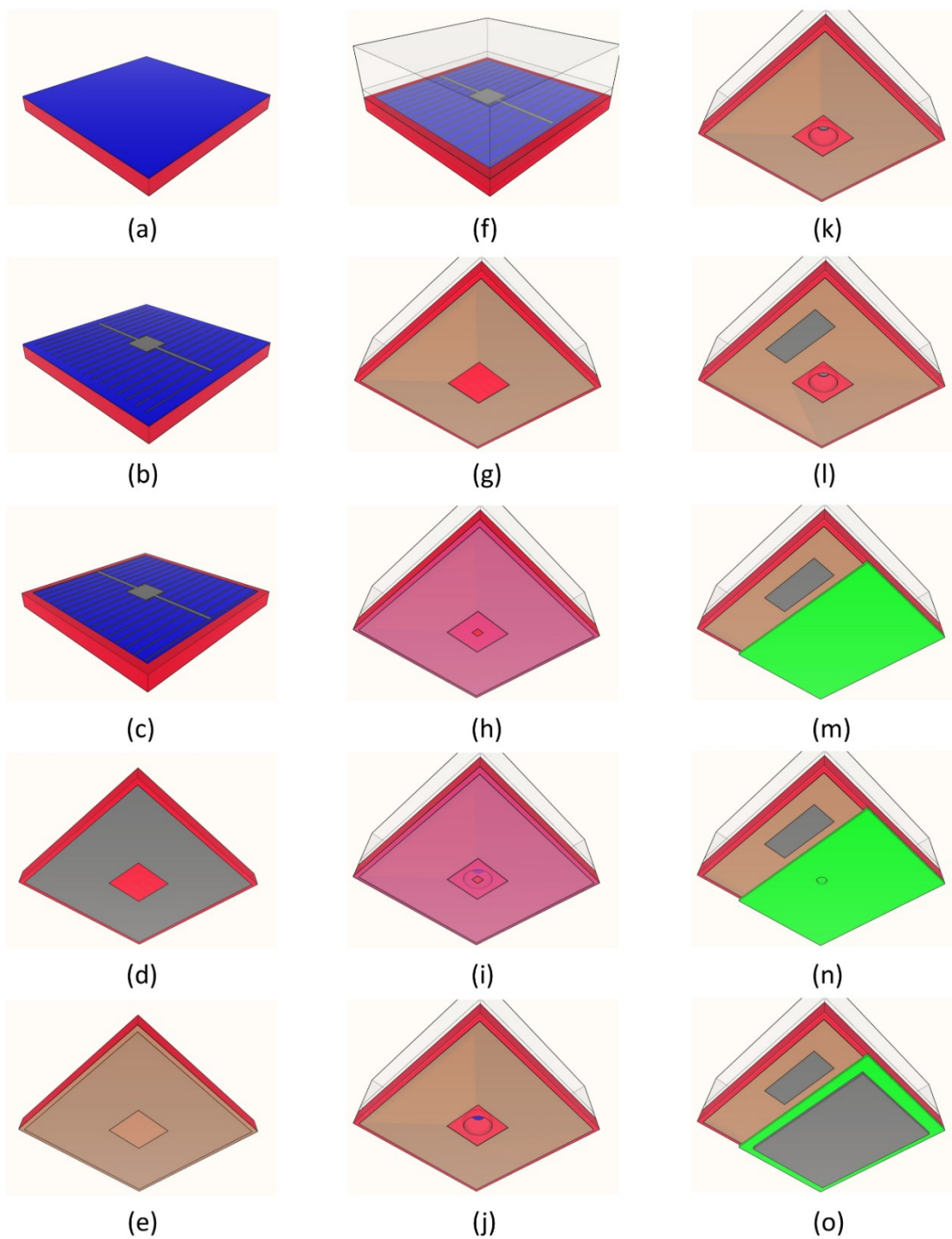


Figure 0-9: Schéma étape par étape de l'échantillon. Vue isométrique.

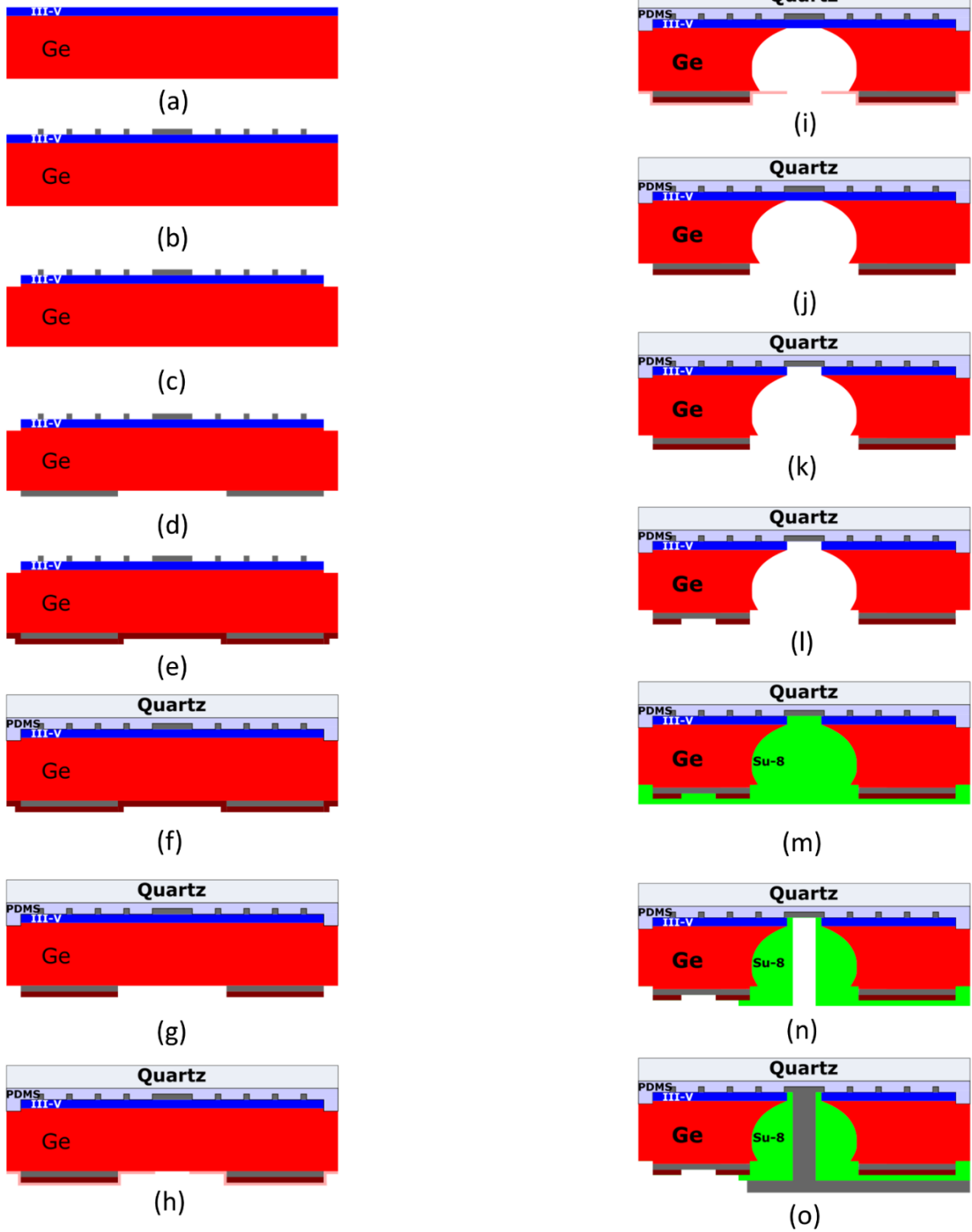
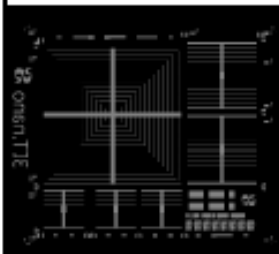
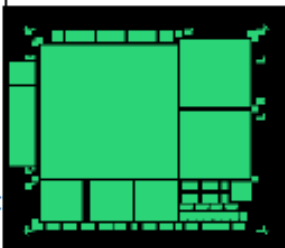


Figure 0-10 :Schéma en coupe de l'échantillon étape par étape. Le dessin n'est pas à l'échelle pour permettre de visualiser les couches fines

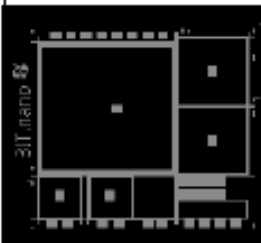
Le tableau suivant détaille le procédé FFF. Les couleurs à gauche indique la ou les faces à laquelle/auxquelles s'adressent l'étape (rouge= face arrière, bleu=face avant, violet=les deux).

N°	Nom	Paramètres	Description/Justification/ Commentaire	Image/Schéma
0_0	État initial		On démarre avec un substrat de Ge portant déjà les couches épitaxiées.	Process flow (a)
0_1	Nettoyage solvants	Acétone 5min, Acétone (deuxième bain) 5min, Alcool Isopropylique (IPA) 5min, Eau désionisée (H2O) 5min, séchage au diazote (N2).	Les échantillons arrivant du dicing portent un film plastique collent ainsi qu'une résine de lithographie utilisée pour la protection. Il convient de les ôter.	
0_1	Plasma O2	Plasmaline 5min 150W	Le nettoyage plasma permet le retrait des éventuels restes après le nettoyage solvant (trace de résine brûlées, ou dépôts invisible, états de surface...)	
0_2	Gravure du nitrure face arrière	HF 49% jusqu'à disparition de la couleur + 20s	On retire la couche de nitrure déposée en face arrière pour optimiser les contraintes pendant l'épithaxie. (~1min 30+20s normalement)	
1_0	Lithographie 1 dépôt du contact émetteur épais		On veut obtenir par lift-off la métallisation épaisse face avant et ses motifs.	
1_1	Déshydratation	Plaque chauffante T>110°C, 5min minimum	Dans ce procédé, tout recuit ou toute déshydratation se font sur un wafer propre dédié pour éviter la contamination de la face opposée par les traces sur la plaque chauffante	
1_2	Étalement et recuit de résine Lor38	3000rpm, recuit 150°C 3min, plaque chauffante	Cette résine permet de garantir un soulèvement de qualité en créant une marche sous la résine qui mènera à une discontinuité du film de métal déposé permettant la séparation et le retrait du métal non-désiré.	

1_3	Étalement et recuit de résine négative AZnLOF 2020	3000rpm, recuit 110°C 1min30, plaque chauffante	Cette résine servira de couche photosensible pour recevoir le motif lors de l'exposition. Une résine négative plus épaisse telle que la futurex aurait pu être utilisée.	
1_4	Exposition	Sans alignement, aligneuse OAI 200, courant max du moteur 10mA, dose 110mJ/cm ² . Masque Hawaii TM	Le courant du moteur est fixé à 10mA pour ne pas exercer de force excessive sur l'échantillon. Un support de caoutchouc disponible est utilisé pour réduire le risque de casse très présent du fait des 4 vis du porte-échantillon.	
1_5	Post Exposure Bake (PEB)	110°C, 1min, plaque chauffante	Cette étape permet le renforcement des zones insolées. Les zones non insolées ne changent pas et seront dissoutes dans le développeur	
1_6	Développement	Immersion MF319, 1min		
1_7	Contrôle microscopique		On s'assure du bon fonctionnement de la lithographie.	
1_8	Descum	Plasmaline 100W 1min	On veut se débarrasser d'éventuels restes nanométriques de résine dans les zones ne devant pas en porter.	
2_0	Dépôt du métal épais par évaporation			Process flow (b)
2_1	Désoxydation de la surface	Buffered Oxyde Etch (BOE) 20s	On désoxyde la surface recevant le dépôt pour assurer le meilleur contact électrique et la meilleure adhésion possible.	
2_2	Dépôt du métal par évaporation	Évaporateur Edwards; Nickel 50nm, Ge 20nm, Ni 30nm, Or 1µm	Cette combinaison de métaux permet d'atteindre un contact ohmique avec la face avant.	
2_3	Soulèvement	Remover 165 chauffé à 60°C, ~2h	Retrait des bouts de métaux par aspiration (pompe péristaltique) et jet de remover (pipette, manuel)	

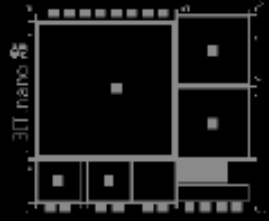
2_4	Nettoyage solvants	Acétone 5 minutes, IPA 5min, H2O 5min, séchage N2.	Utilisation de vaisselle à lift-off, lors du transfert d'une solution à l'autre un léger jet de la solution avec une pissette permet de maximiser les chances que tous les morceaux métalliques restent dans le bain précédent	
2_5	Plasma O2	Plasmaline 5 min 150W		
2_6	Observation microscopique du lift off			
3_0	Lithographie 2 Mésas		On veut déposer la résine permettant le masquage pendant la gravure méso	
3_1	Déshydratation	Plaque chauffante T>110°C, 5min minimum		
3_2	Étalement et recuit de primer	4500rpm, 60s, recuit 110°C 1 min, plaque chauffante		
3_3	Étalement et recuit de résine positive AZp4903	4500rpm, 60s, recuit 110°C 2 min, plaque chauffante		
3_4	Exposition	Alignement sur niveau TM, aligneuse OAI 200, moteur 10mA, dose 583mJ/cm². Masque Hawaii MS	On n'a pas besoin de PEB ici car c'est une résine positive qui n'en nécessite pas	
3_5	Développement	Immersion AZ400 1:3, 3min		
3_6	Contrôle microscopique			
3_7	Descum	Plasmaline 100W 1min		


4_1	Gravure Mésa	Machine ICP III-V recette MH_2SiCl_2 , 13 min.	Collage par cristal bond sur wafer support "fused silica" pour bon contact thermique. Contrôle du bon déroulement grâce au spectroscopie intégré.	Process flow (c)
4_2	Plasma O_2	Plasmaline 100W 1min	On veut retirer l'éventuelle croûte de résine brûlée/asséchée lors du plasma	
4_3	Retrait cristal bond	H_2O chaude ($T > 66^\circ\text{C}$)	On dissout les traces de cristal bond sur la face arrière de l'échantillon avant de le plonger dans les bains de solvant qui font floculer la cristal bond sans la dissoudre.	
4_4	Retrait de la résine	Remover 1165 chaud ~2h		
4_5	Nettoyage aux solvants	Acétone 5 minutes, IPA 5min, H_2O 5min, séchage N_2 .		
4_6	Plasma O_2	Plasmaline 150W 5min		
4_7	Contrôle au microscope		Propreté et défauts	
5_0	Alignement par perforation laser		L'alignement des motifs entre les deux faces se fait par le transfert de certaines marques d'alignement face arrière. Ceci est fait sur le laser LPKF du LCP.	
5_1	Déshydratation	Plaque chauffante $T > 110^\circ\text{C}$, 5min minimum		
5_2	Étalement de résine de protection (face avant)	3000rpm, recuit 1 minute 110°C plaque chauffante	Les deux faces doivent être protégées, le premier recuit se fait sur plaque (dépôt face avant), le deuxième généralement en étuve pour éviter de déposer la résine sur la plaque.	
5_3	Étalement de résine de protection (face arrière)	3000rpm, recuit 2min 125°C à l'étuve	Le deuxième recuit à l'étuve permet de ne pas coller l'échantillon sur la plaque	

5_4	Dépôt de "Blue tape" sur les deux faces		Il est suggéré de poser un premier morceau de "tape" face collante vers le haut puis d'ajouter l'échantillon par-dessus (Ge vers le bas pour coller la face plane). Le deuxième "tape" est déposé en l'appliquant sur la surface à l'aide d'une règle pour éviter les bulles. Les éventuelles bulles sur les marques à perforées peuvent être chassées par une pression délicate avec une pince plastique.	
5_5	Perforation laser		Les marques à perforer doivent être indiquées à l'opératrice/opérateur du laser. Le décalage dans l'écriture du laser exige l'écriture marque par marque.	
5_6	Nettoyage aux solvants	Acétone 5min, Acétone (deuxième bain) 5min, IPA 5min, H2O 5min, séchage N2	Retrait du "tape" dans le premier bain	
5_7	Plasma O2	Plasmaline 150W 5min		
5_8	Contrôle au microscope		Bien contrôler les deux face. La propreté de la face arrière est plus importante ici	
6_0	Lithographie 3 dépôt du contact de base			
6_1	Déshydratation	Plaque chauffante T>110°C, 5min minimum	Dans ce cas, même si le dépôt est destiné à la face arrière, on commence par la face avant pour protéger les cellules des éventuelles griffures infligées par le porte échantillon de l'étauseuse ou de l'aligneuse.	

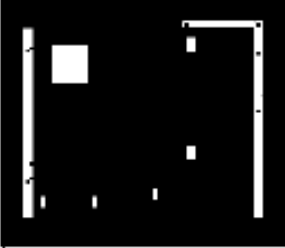
6_2	Étalement et recuit de résine Lor3B	Brewer, 3000rpm 30s, recuit 175°C	Cette température permet de poser cette face sur une plaque à 150°C sans causer de collage. Si la température est plus haute on observe parfois la formation de bulles dans l'edge bead (observé à 195°C)	
6_3	Étalement et recuit de résine Lor3B	Brewer, 3000rpm 30s, recuit 150°C		
6_4	Étalement et recuit de résine positive AZ1518	Brewer, 3000rpm 60s, recuit 120°C 2min		
6_5	Exposition	Alignement sur marques perforées, aligneuse OAI 200, courant max du moteur 10mA, dose 88mJ/cm². Masque Hawaii BM	Le courant du moteur est fixé à 10mA pour ne pas exercer de force excessive sur l'échantillon. Un support de caoutchouc disponible est utilisé pour réduire le risque de casse très présent du fait des 4 vis du porte-échantillon.	
6_6	Développement	Immersion MF319, 1min		
6_7	Contrôle microscopique		On s'assure du bon fonctionnement de la lithographie.	
7_0	Dépôt du métal par évaporation			Process flow (d)
7_1	Désoxydation de la surface	Buffered Oxyde Etch (BOE) 20s, (utilisation de H2O possible à la place)	On désoxyde la surface recevant le dépôt pour assurer le meilleur contact électrique et la meilleure adhésion possible.	
7_2	Dépôt du métal par évaporation	Évaporateur Edwards; Ni 150nm	Ce métal donne un contact ohmique avec la face arrière.	
7_3	Soulèvement	Remover 165 chauffé à 60°C, ~2h		
7_4	Nettoyage solvants	Acétone 5 minutes, IPA 5min, H2O 5min, séchage N2.		
7_5	Plasma O2	Plasmaline 5 min 150W		
7_6	Observation microscopique du lift off et de la face avant		Observation des deux faces. La face avant particulièrement doit être parfaitement propre.	

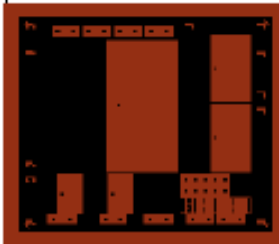
8	Caractérisation TLM	Station sous pointe, mesure 4 pointes	On évalue la qualité de la couche contact ainsi que la qualité du contact ohmique formé	
9	Gravure de la couche contact	~60s dans NH ₄ OH/H ₂ O ₂ /H ₂ O 9/9/240. Rinçage dans 2 bécchers de H ₂ O différents	Gravure auto-alignée grâce à la métallisation avant. Se référer au protocole du groupe pour la préparation de solution.	
10	Mesure 1-soleil des cellules	Station 1-soleil	On obtient une courbe par cellule permettant d'avoir une référence de ses performances sans les procédés spécifique au report de contact	
11_1	Dépôt d'un oxyde protecteur par pulvérisation cathodique	Oxyde de 1µm	On veut avoir une couche qui protégera la métallisation de base pendant la gravure des matériaux III-V en fond de via	Process flow (e)
12_0	Collage et protection de la face avant		On veut protéger la face avant de toute agression pendant la suite du procédé. De plus, un superstrat est nécessaire à la tenue mécanique du métal face	
12_1	Préparation du PDMS	Mélange à 10:1 massique du monomère et de l'initiateur Sylgarde	On prépare le PDMS à déposer	
12_2	Collage de l'échantillon sur "heat release tape"		On colle la face non active sur un wafer de support puis on dépose la face Ge sur la face active.	
12_3	Dépôt du PDMS	A la pipette.	Il faut couvrir chacune des cellules pour assurer l'absence de bulle	
12_4	Dépôt de la lame de quartz		Étape à faire délicatement. On met le centre de l'échantillon en contact avant tout. Ainsi les éventuelles bulles seront repoussées sur les bords à l'application d'une pression.	
12_5	Réticulation et aplatissement du PDMS	Poids 500g, plaque à 110°C, 1h	Utilisation du montage de collage dit "montage ghetto"	
12_6	Libération du "heat release tape"	Chauffage à 150°C sur plaque	Détection visuelle de la libération	

12_7	Réticulation supplémentaire du PDMS	150°C sur plaque 10 minutes		
12_8	Plasma O2	Plasmaline 5min 150W	Supprimer les états de surfaces laissés par le "heat release tape"	Process flow (f)
13_0	Lithographie 4 Ouverture de l'oxyde protecteur		On doit ouvrir l'oxyde protecteur autour des vias. Dans un souci de ne pas écrire un nouveau masque, le masque Hawaii BM est utilisé	
13_1	Déshydratation	Plaque chauffante T>110°C, 5min minimum		
13_2	Étalement et recuit de MCC primer 80/20	3000rpm 30s, recuit 110°C 2min sur plaque		
13_3	Étalement et recuit de résine positive AZ9245	3000rpm 30s, recuit 110°C 2min sur plaque		
13_4	Exposition	Alignement sur niveau BM, aligneuse OAI 200, moteur 10mA, dose 195mJ/cm². Masque Hawaii Bm	On n'a pas besoin de PEB ici car c'est une résine positive qui n'en nécessite pas	
13_5	Développement	Immersion AZ 400K 1:3, 2min		
13_6	Contrôle microscopique			
13_7	Descum	Plasmaline 100W 1min		
14_0	Gravure de l'oxyde de protection		On veut transférer les motifs de la résine à l'oxyde afin de révéler le Ge	Process flow (g)

14_1	Gravure de l'oxyde	RIE March. Recette CF4 etch 74%, 300W itérations de cycles de 2min30s maximum	Cette gravure peut aussi être faite dans l'AOE. On procède par cycles de 2min30s maximum pour éviter la surchauffe de l'échantillon. Le contrôle en température de la RIE est mauvais si ce n'est inexistant. On laisse donc l'échantillon refroidir à chaque fois en le sortant de la chambre. Ici aucun temps n'est donné car le seul lot pour lequel cette étape a été faite avant un oxyde trop épais.	
14_2	Contrôle électrique	Station sous pointe, on pose 2 pointes sur le Ge et on vérifie qu'on a une couche conductrice		
14_3	Plasma O2	Plasmaline 100W 1min	Retrait de l'éventuelle croûte de résine durcie par le plasma	
14_4	Retrait de la résine	Remover 1165 chaud ~2h		
14_5	Nettoyage aux solvants	Acétone 5 minutes, IPA 5min,		
14_6	Plasma O2	Plasmaline 150W 5min		
14_7	Contrôle microscopique			
14_0	Lithographie 5 Ouverture des vias			 <p>Process flow (h)</p>
14_1	Déshydratation	Plaque chauffante T>110°C, 5min minimum		
14_2	Étalement et recuit de résine positive AZnLOF2020	3000rpm, recuit 110°C 1min30, plaque chauffante		

14_3	Étalement et recuit de résine positive AZnLOF2020	3000rpm, recuit 110°C 1min30, plaque chauffante	Les deux couches sont nécessaires pour empêcher une flexion de la résine suspendue par la gravure Ge. L'impact exact de cette flexion sur la forme du via obtenu n'a pas été étudié en détail.	
14_4	Exposition	Alignement marques dédiées du niveau BM, aligneuse OAI 200, moteur 10mA, dose 110mJ/cm². Masque Hawaii VO	Il est conseillé sur la datasheet de laisser la résine reposer pour qu'elle se réhydrate (des molécules H2O sont nécessaires à la réaction photo-activée). Un repos de 30 minutes est conseillé	
14_5	PEB	110°C, 1min		
14_6	Développement	Immersion MF319, 1min		
14_7	Contrôle microscopique			
14_8	Descum	Plasmaline 100W 1min		
15_1	Gravure du Ge	Machine ICP III-V recette SF6_XAV	Collage par cristal bond sur wafer support "fused silica" pour bon contact thermique. Le SF6 est alterné avec des purges oxygène car on ne peut pas introduire les deux gaz en même temps mais l'oxygène permet de se débarrasser des sous-produits soufrés générés	Process flow (j)
15_2	Décapage de la résine	Plasma O2, fin détectée au spectroscope (~15 à 20 minutes)	On peut éventuellement retirer la résine aux solvants mais la AZnLOF2020 se révèle capricieuse et on doit de toute façon allumer un plasma O2 assez long (~10minutes) pour nettoyer les dépôts sur les murs de la machine.	Process flow (j)
15_3	Observation microscopique			

15_4	Nettoyage MF319	Immersion 3min	On cherche à se débarrasser des éventuels dépôts sur la couche de nucléation. On ne connaît pas leur nature ni leur effet exact mais le MF319 les fait disparaître rapidement sans endommager le reste de l'échantillon.	
16	Gravure III-V du via	Machine ICP III-V recette MJHSiCl, ~8min	Collage par cristal bond sur wafer support "fused silica" pour bon contact thermique. Contrôle du bon déroulement grâce au spectroscope intégré. On dissout les traces de cristal bond sur la face arrière de l'échantillon avant de le plonger dans les bains de solvant qui font floculer le cristal bond sans la dissoudre.	Process flow (k)
16_1	Retrait cristal bond	H2O chaude (T>66°C)		
17_0	Litho 6 Ouverture du contact de base		On fait une ouverture dans l'oxyde de protection restant. Cette ouverture permettra la mesure de la cellule. L'ouverture est locale pour contrôler la faible contrainte sur les dimensions dans la sérigraphie. L'ouverture est pratiquée loin de la zone métallisée. A condition d'avoir une sérigraphie robuste et précise on pourrait faire cette gravure à la fin en auto-aligné sur la Su-8	
17_1	Déshydratation	Plaque chauffante T>110°C, 5min minimum		
17_2	Étalement et recuit de MCC primer 80/20	3000rpm 30s, recuit 110°C 2min sur plaque		
17_3	Étalement et recuit de résine positive AZ9245	3000rpm 30s, recuit 110°C 2min sur plaque		
17_4	Exposition	Alignement sur niveau BM, aligneuse OAI 200, moteur 10mA, dose 195mJ/cm². Masque Hawaii BO		
17_5	Développement	Immersion AZ 400K 1:3, 2min		

17_6	Contrôle microscopique			
17_7	Descum	Plasmaline 100W 1min		
18_1	Gravure RIE de l'oxyde de protection	Cf4, 74%, 300W, itérations de cycles de 2min30 max, collage cristal bond sur wafer de 200mm de Si	On n'a pas le choix sur la machine plasma utilisée (la Su-8 et la pâte d'argent sont interdites dans l'AOE). Le contrôle en température de la RIE est quasi nul. On procède par répétition de cycles courts en laissant le wafer refroidir entre chacun. On empêche ainsi d'avoir un impact de la température (bouillonnement de la résine ou autre). Ici aucun temps n'est donné car le seul lot pour lequel cette étape a été faite avant un oxyde trop épais.	Process flow (I)
18_2	Contrôle du succès de la gravure	Test I-V à 2 pointes sur la station	On veut obtenir une caractéristique de résistance indiquant l'absence d'oxyde à cet endroit.	
18_3	Plasma O2	Plasmaline 100W 1min	Retrait de l'éventuelle croûte de résine durcie par le plasma	
18_4	Retrait de la résine	Remover 1165 chaud ~2h		
18_5	Nettoyage aux solvants	Acétone 5 minutes, IPA 5min, H2O 5min, séchage N2.		
18_6	Plasma O2	Plasmaline 150W 5min		
18_7	Contrôle microscopique			
19_0	Lithographie 7 : Isolation électrique du via		On va utiliser la résine Su-8 pour isoler électriquement le via	

19_1	Déshydratation et dépôt de HDMS	Prime oven, programme 0 (24min)	Le four d'apprêt permet de déshydrater les échantillons (150°C à basse pression). Dans le même programme, du primer HDMS est déposé en phase vapeur sur toutes les surfaces de l'échantillon. Ainsi même les zones difficiles à atteindre par étalement auront une adhésion renforcée avec la Su-8	
19_2	Dépôt du liner de Su-8 2005	2000rpm 30s (programme PE2000 Su-8), recuit sur plaque, 95°C 2 minutes	Cette première couche de Su-8 très fluide permet d'accumuler de la résine en fond de via en minimisant le nombre de bulles piégées. On passe l'échantillon au dessiccateur en cas de bulles avant de spinner. Les bulles non supprimées ainsi sont retirées à la main à la pipette.	
19_3	Dépôt de la première couche de Su-8 2150 diluée à 0,78	2000rpm 30s (programme PE2000 Su-8), recuit sur plaque, 95°C 30 minutes	On passe l'échantillon au dessiccateur en cas de bulles avant de spinner. Les bulles non supprimées ainsi sont retirées à la main à la pipette.	
19_4	Dépôt de la deuxième couche de Su-8 2150 diluée à 0,78	2000rpm 30s (programme PE2000 Su-8), recuit sur plaque, 95°C 30 minutes	On passe l'échantillon au dessiccateur en cas de bulles avant de spinner. Les bulles non supprimées ainsi sont retirées à la main à la pipette.	Process flow (m)
19_5	Exposition	Alignement sur niveau BM, aligneuse OAI 200, moteur 10mA, dose 220mJ/cm². Masque Hawaii DI	Dose convenable mais qui pourrait peut-être être augmenté. Deux versions du masque Hawaii DI existent. Il est préférable d'utiliser la deuxième version qui a des ouvertures plus grandes dans les vias	


			Généralement on laisse reposer la Su-8 12h minimum dans cet état. Théoriquement, cela permet une diffusion des molécules qui va permettre de réduire les contraintes présentes dans le film de résine. De la même manière on perd légèrement en précision des motifs (14nm/h). Ce n'est pas un problème considérant la taille de nos motifs. Les bienfaits exacts n'ont pas été mesurés	
19_6	PEB	5min, 80°C, plaque chauffante		
19_7	Développement	Immersion dans Su-8 developper, 6 minutes avec agitation. Rincage dans IPA	C'est souvent à cette étape que l'on constate les premiers problèmes de décollement.	Process flow (n)
19_8	Contrôle microscopique			
19_9	Hard bake	15 minutes 150°C	On fait ici réticuler très fortement la Su-8 restante ce qui la rend très robuste chimiquement et mécaniquement. On constate aussi la fermeture d'éventuelles fissure du film apparues pendant le développement.	
20_1	Sérigraphie à la pâte d'argent	Masque kapton aligné sur les vias, epoxy d'argent mélangé à 1:1. Dépôt manuel au Q-tip	Alignement manuellement à la binoculaire. Le masque est fixé par "tape bleu"	 Process flow (o)
20_2	Recuit de réticulation	15min, 115°C plaque chauffante		
21	Mesure 1-soleil des cellules	Montage 1 soleil modifié	Le dispositif est fini et doit être caractérisé	

Figure 0-11 : Process flow détaillé étape par étape pour le procédé FFF. Les couleurs à gauche indique la ou les faces à laquelle/auxquelles s'adressent l'étape (rouge= face arrière, bleu=face avant, violet=les deux). La colonne de droite apporte des informations supplémentaires ainsi que des renvois aux schémas d'étapes donnés précédemment (Figure 0-10 et Figure 0-11).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] C. Algora et I. Rey-Stolle, *Handbook on Concentrator Photovoltaic Technology*. John Wiley & Sons, 2016.
- [2] M. A. Green, Y. Hishikawa, E. D. Dunlop, D. H. Levi, J. Hohl-Ebinger, et A. W. Y. Ho-Baillie, « Solar cell efficiency tables (version 52) », *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol. 26, n° 7, p. 427-436, juill. 2018, doi: 10.1002/pip.3040.
- [3] NREL, « Best research cell efficiencies ». juin 16, 2019, [En ligne]. Disponible sur: <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies-190416.pdf>.
- [4] W. Shockley et H. J. Queisser, « Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells », p. 11.
- [5] S. Rühle, « Tabulated values of the Shockley–Queisser limit for single junction solar cells », *Sol. Energy*, vol. 130, p. 139-147, juin 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.02.015.
- [6] X. Ouyang et B. Lin, « Levelized cost of electricity (LCOE) of renewable energies and required subsidies in China », *Energy Policy*, vol. 70, p. 64-73, juill. 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2014.03.030.
- [7] K. Branker, M. J. M. Pathak, et J. M. Pearce, « A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, n° 9, p. 4470-4482, déc. 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.07.104.
- [8] R. Loeckenhoff, J. Wilde, F. Dimroth, et A. W. Bett, « APPROACHES TO LARGE AREA III-V CONCENTRATOR RECEIVERS », p. 6, 2006.
- [9] A. Datas et P. G. Linares, « Monolithic interconnected modules (MIM) for high irradiance photovoltaic energy conversion: A comprehensive review », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 73, p. 477-495, juin 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.01.071.
- [10] F. Dimroth et S. Kurtz, « High-Efficiency Multijunction Solar Cells », *MRS Bull.*, vol. 32, n° 3, p. 230-235, 2007, doi: 10.1557/mrs2007.27.
- [11] S. Franssila, *Introduction to Microfabrication: Franssila/Introduction to Microfabrication*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
- [12] A. Luque et V. M. Andreev, Éd., *Concentrator photovoltaics*. Berlin: Springer, 2007.
- [13] M. Stefancich, A. Antonini, E. Milan, G. Martinelli, M. Butturi, et P. Zurru, « OPTICAL TAILORING OF FLAT FACETED COLLECTOR FOR OPTIMAL FLUX DISTRIBUTION ON CPV RECEIVER », p. 4.
- [14] M. Steiner *et al.*, « Increasing the Energy Yield of CPV Modules through Optimized Solar Cell Interconnection », 2011, p. 404-408, doi: 10.1063/1.3658371.

- [15] F. L. Siaw et K. K. Chong, « An interconnection reconfiguration method for concentrator photovoltaic array », juin 2013, p. 0486-0488, doi: 10.1109/PVSC.2013.6744195.
- [16] F.-L. Siaw, K.-K. Chong, et C.-W. Wong, « A comprehensive study of dense-array concentrator photovoltaic system using non-imaging planar concentrator », *Renew. Energy*, vol. 62, p. 542-555, févr. 2014, doi: 10.1016/j.renene.2013.08.014.
- [17] P. Albert *et al.*, « High voltage Low current Multijunction Monolithic Interconnected Microcells », présenté à CPV 15, Fès, juin 25, 2019.
- [18] M. Steiner, G. Siefer, et A. W. Bett, « An investigation of solar cell interconnection schemes within CPV modules using a validated temperature-dependent SPICE network model: Investigation of solar cell interconnection schemes », *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol. 22, n° 5, p. 505-514, mai 2014, doi: 10.1002/pip.2284.
- [19] E. V. Kerschaver et G. Beaucarne, « Back-contact solar cells: a review », *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol. 14, n° 2, p. 107-123, mars 2006, doi: 10.1002/pip.657.
- [20] T. Salvetat *et al.*, « III-V multi-junction solar cell using metal wrap through contacts », 2016, p. 060004, doi: 10.1063/1.4962094.
- [21] E. Oliva *et al.*, « GaInP/AlGaAs metal-wrap-through tandem concentrator solar cells: Metal-wrap-through tandem concentrator solar cells », *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol. 25, n° 7, p. 477-483, juill. 2017, doi: 10.1002/pip.2844.
- [22] O. Fidaner et M. West Wiemer, « Multi-junction solar cells with through-via contacts », avr. 04, 2013.
- [23] O. Fidaner, M. West Wiemer, L. Zhang, et E. Lucow, « Multi-junction solar cells with recessed through-substrate vias », mars 30, 2015.
- [24] A. Itou *et al.*, « High-efficiency thin and compact concentrator photovoltaics using micro-solar cells with via-holes sandwiched between thin lens-array and circuit board », *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 53, n° 4S, p. 04ER01, janv. 2014, doi: 10.7567/JJAP.53.04ER01.
- [25] O. Fidaner *et al.*, « High efficiency micro solar cells integrated with lens array », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 104, n° 10, p. 103902, mars 2014, doi: 10.1063/1.4868116.
- [26] M. D. LAFONTAINE, « Mémoire de maitrise », p. 110.
- [27] M. D. LAFONTAINE, « SCA 772 Définition du projet de recherche au doctorat », p. 90.
- [28] O. Richard, A. Jaouad, B. Bouzazi, R. Arès, S. Fafard, et V. Aimez, « Simulation of a through cell via contacts architecture for HCPV multi-junction solar cells », *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 144, p. 173-180, janv. 2016, doi: 10.1016/j.solmat.2015.08.032.

- [29] K.-H. Shim *et al.*, « Characteristics of germanium dry etching using inductively coupled SF₆ plasma », *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 15, n° 4, p. 364-370, août 2012, doi: 10.1016/j.mssp.2011.12.002.
- [30] M. Darnon *et al.*, « Deep germanium etching using time multiplexed plasma etching », *J. Vac. Sci. Technol. B Nanotechnol. Microelectron. Mater. Process. Meas. Phenom.*, vol. 33, n° 6, p. 060605, nov. 2015, doi: 10.1116/1.4936112.
- [31] K. Asakawa, T. Yoshikawa, S. Kohmoto, Y. Nambu, et Y. Sugimoto, « Chlorine-Based Dry Etching of III/V Compound Semiconductors for Optoelectronic Application », *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 37, n° Part 1, No. 2, p. 373-387, févr. 1998, doi: 10.1143/JJAP.37.373.
- [32] K. Hjort, « Sacrificial etching of III - V compounds for micromechanical devices », *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 6, n° 4, p. 370-375, déc. 1996, doi: 10.1088/0960-1317/6/4/003.
- [33] J. R. Flemish et K. A. Jones, « Selective Wet Etching of GaInP, GaAs, and InP in Solutions of HCl, CH₃COOH, and H₂O₂ », *J Electrochem Soc*, vol. 140, n° 3, p. 4, 1993.
- [34] M. de Lafontaine *et al.*, « Via sidewall insulation for through cell via contacts », 2017, p. 040002, doi: 10.1063/1.5001424.
- [35] A. Turala, A. Jaouad, D. P. Masson, S. Fafard, R. Arès, et V. Aimez, « Isolation of III-V/Ge Multijunction Solar Cells by Wet Etching », *Int. J. Photoenergy*, vol. 2013, p. 1-7, 2013, doi: 10.1155/2013/583867.
- [36] P. T. Bowman, « A Potential Hazard in Preparing Bromine-Methanol Solutions », *J. Electrochem. Soc.*, vol. 137, n° 4, p. 1309, 1990, doi: 10.1149/1.2086655.
- [37] Z. Yong, H. Li, et W. Zhang, « Fabrication of dielectric insulation layers in TSV by different processes », déc. 2014, p. 684-687, doi: 10.1109/EPTC.2014.7028393.
- [38] E. Beyne, « Reliable Via-Middle Copper Through-Silicon Via Technology for 3-D Integration », *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, vol. 6, n° 7, p. 983-992, juill. 2016, doi: 10.1109/TCPMT.2015.2495166.
- [39] N. P. Pham *et al.*, « Photoresist coating and patterning for through-silicon via technology », *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 18, n° 12, p. 125008, déc. 2008, doi: 10.1088/0960-1317/18/12/125008.
- [40] Microchem, « Fiche technique SU-8 série 2025 à 2075 ». [En ligne]. Disponible sur: <http://microchem.com/pdf/SU-82000DataSheet2025thru2075Ver4.pdf>.
- [41] M. Reynolds, A. Elias, D. G Elliott, C. Backhouse, et D. Sameoto, « Variation of thermal and mechanical properties of KMPR due to processing parameters », *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 22, n° 12, p. 125023, déc. 2012, doi: 10.1088/0960-1317/22/12/125023.
- [42] HD microsystems, « Fiche technique HD série 4100 ». [En ligne]. Disponible sur: https://crn2.3it.usherbrooke.ca/guide_sb/produits/resines/HD-4100_ProcessGuide.pdf.

- [43] Fujifilm, « Fiche technique durimide série 7300 ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.fujifilmusa.com/shared/bin/Durimide%207300_US12.pdf.
- [44] Y. Zhuang *et al.*, « Novel spray coating process with polymer material applied in CIS wafer-level-packaging », *déc. 2014*, p. 688-692, doi: 10.1109/EPTC.2014.7028410.
- [45] P. Kersten, S. Boustra, et J. W. Petersen, « Photolithography on micromachined 3D surfaces using electrodeposited photoresists », *Sens. Actuators Phys.*, vol. 51, n° 1, p. 51-54, oct. 1995, doi: 10.1016/0924-4247(95)85003-1.
- [46] M. Stucchi, D. Perry, G. Katti, W. Dehaene, et D. Velenis, « Test Structures for Characterization of Through-Silicon Vias », *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, vol. 25, n° 3, p. 355-364, août 2012, doi: 10.1109/TSM.2012.2202798.
- [47] C. Laucher, « Développement et caractérisation d'un procédé de photo-plaquage pour des cellules solaires CPV triple-jonctions III-V/Ge », *Définition de Projet de Recherche*, 2018.
- [48] D. Erath *et al.*, « Advanced screen printing technique for high definition front side metallization of crystalline silicon solar cells », *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 94, n° 1, p. 57-61, janv. 2010, doi: 10.1016/j.solmat.2009.05.018.
- [49] A. Schönecker, « AN INDUSTRIAL MULTI-CRYSTALLINE EWT SOLAR CELL WITH SCREEN PRINTED METALLISATION », p. 5.
- [50] F. J. García, A. Ortiz-Conde, et A. Sa-Neto, « CdS/ *p* -Si solar cells made by serigraphy », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 52, n° 15, p. 1261-1263, avr. 1988, doi: 10.1063/1.99175.
- [51] « Silver Conductor Pastes (Ag) | ESL Electroscience ». <http://www.electroscience.com/taxonomy/term/71/3> (consulté le oct. 08, 2019).
- [52] S. Guo, G. Gregory, A. M. Gabor, W. V. Schoenfeld, et K. O. Davis, « Detailed investigation of TLM contact resistance measurements on crystalline silicon solar cells », *Sol. Energy*, vol. 151, p. 163-172, juill. 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.05.015.
- [53] C. Xu, J. Wang, M. Wang, H. Jin, Y. Hao, et C. P. Wen, « Reeves's circular transmission line model and its scope of application to extract specific contact resistance », *Solid-State Electron.*, vol. 50, n° 5, p. 843-847, mai 2006, doi: 10.1016/j.sse.2006.03.007.
- [54] G. K. Reeves, « Specific Contact Resistance using a circular transmission line model », *Solid-State Electron.*, vol. 23, p. 487-490, 1980.
- [55] C. Laucher *et al.*, « Permanent bonding process for III-V/Ge multijunction solar cell integration », présenté à 14TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCENTRATOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS (CPV-14), Puertollano, Spain, 2018, p. 090004, doi: 10.1063/1.5053542.
- [56] V. M. Donnelly et A. Kornblit, « Plasma etching: Yesterday, today, and tomorrow », *J. Vac. Sci. Technol. Vac. Surf. Films*, vol. 31, n° 5, p. 050825, sept. 2013, doi: 10.1116/1.4819316.

- [57] P. G. Jones, H. Rumpel, G. M. Sheldrick, et E. Schwarzmann, « Gold(III) oxide and oxychloride », *Gold Bull.*, vol. 13, n° 2, p. 56-56, juin 1980, doi: 10.1007/BF03215453.
- [58] T. A. Anhoj, A. M. Jorgensen, D. A. Zauner, et J. Hübner, « Optimization of SU-8 processing for integrated optics », présenté à MOEMS-MEMS 2006 Micro and Nanofabrication, San Jose, CA, janv. 2006, p. 611009, doi: 10.1117/12.646489.
- [59] W. Dai, K. Lian, et W. Wang, « A quantitative study on the adhesion property of cured SU-8 on various metallic surfaces », *Microsyst. Technol.*, vol. 11, n° 7, p. 526-534, juill. 2005, doi: 10.1007/s00542-005-0587-4.
- [60] J. Ge et J. K. Kivilahti, « Effects of surface treatments on the adhesion of Cu and Cr/Cu metallizations to a multifunctional photoresist », *J. Appl. Phys.*, vol. 92, n° 6, p. 3007-3015, sept. 2002, doi: 10.1063/1.1495528.
- [61] J. Melai, V. M. B. Carballo, C. Salm, R. Wolters, et J. Schmitz, « Further outgassing studies on SU-8 », p. 5.
- [62] R. Feng et R. J. Farris, « Influence of processing conditions on the thermal and mechanical properties of SU8 negative photoresist coatings », *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 13, n° 1, p. 80-88, janv. 2003, doi: 10.1088/0960-1317/13/1/312.
- [63] « MEMScyclopedia - free MEMS encyclopedia ». <http://www.memscyclopedia.org/su8.html> (consulté le févr. 12, 2019).
- [64] A. del Campo et C. Greiner, « SU-8: a photoresist for high-aspect-ratio and 3D submicron lithography », *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 17, n° 6, p. R81-R95, juin 2007, doi: 10.1088/0960-1317/17/6/R01.
- [65] « Pogo pin », *Wikipedia*. oct. 31, 2019, Consulté le: déc. 09, 2019. [En ligne]. Disponible sur: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Pogo_pin&oldid=923869522.
- [66] thermo oriel product line Newport, « User manual: Universal arc lamp housings 500 W family ». .
- [67] T. Nakamoto, K. Makita, T. Tayagaki, T. Aihara, Y. Okano, et T. Sugaya, « Spectral response measurements of each subcell in monolithic triple-junction GaAs photovoltaic devices », *Appl. Phys. Express*, vol. 12, n° 10, p. 102015, oct. 2019, doi: 10.7567/1882-0786/ab45d8.
- [68] M. H. Inge, W. P. Gomes, et K. Strubbe, « Etching of Germanium in Hydrogenperoxide Solutions », *ECS Trans*, vol. 6, p. 375, 2007.
- [69] J. Park et D.-S. Shin, « Application of epoxy-based photosensitive polymers for optical MEMS and subsequent reliability evaluation », *Mater. Chem. Phys.*, vol. 98, n° 2-3, p. 309-315, août 2006, doi: 10.1016/j.matchemphys.2005.09.026.
- [70] C. Salm, V. M. Blanco Carballo, J. Melai, et J. Schmitz, « Reliability aspects of a radiation detector fabricated by post-processing a standard CMOS chip », *Microelectron. Reliab.*, vol. 48, n° 8-9, p. 1139-1143, août 2008, doi: 10.1016/j.microrel.2008.06.038.

- [71] B. Reig *et al.*, « Study of SU-8 reliability in wet thermal ambient for application to polymer micro-optics on VCSELs », *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 53, n° 8S2, p. 08MC03, août 2014, doi: 10.7567/JJAP.53.08MC03.